



UNIVERSIDAD DE CHILE -FACULTAD DE CIENCIAS -ESCUELA DE PREGRADO

Protocolo para la cuantificación de pérdida de suelo producto de la erosividad de la precipitación en la cuenca de Rapel.

Seminario de título entregado a la Facultad de Ciencias de la Universidad de Chile en cumplimiento parcial de los requisitos para optar al Título de Químico Ambiental

Raquel Tamara Saavedra Pino

Director
Dr. Fernando Santibáñez Quezada
Patrocinante
M.Cs. Sylvia Copaja Castillo

Noviembre 2019



INFORME DE APROBACIÓN SEMINARIO DE TÍTULO

Se informa a la Escuela de Pregrado de la Facultad de Ciencias, de la Universidad de Chile que el Seminario de Título presentado por la Srta.

RAQUEL TAMARA SAAVEDRA PINO

Ha sido aprobado por la comisión de Evaluación, en cumplimiento parcial de los requisitos para optar al Título de Químico Ambiental

Director Seminario de Título: _____

Comisión Revisora y Evaluadora

Presidente Comisión: Antonio César Galdámez Silva

Evaluador: Juan Manuel Uribe Meneses

Santiago de Chile, _____

BIOGRAFIA

Raquel Tamara Saavedra Pino nació en Santiago de Chile un 2 de Diciembre de 1991, como la segunda hija de una familia oriunda de la Región de O'Higgins. Sus padres son Clotilde Pino Contreras y Jaime Saavedra Pérez, de profesiones de Técnico agrícola y Profesor de Matemáticas respectivamente, ambos con una gran afinidad al campo . Su hermano mayor es Jaime Saavedra Pino el cual es de profesión Medico y de oficio luthier.

La enseñanza básica de Tamara fue cursada en los establecimientos San Cristóbal de las Casas y la escuela municipal Andes del Sur; mientras que enseñanza media fue en el Liceo Tajamar de Providencia. En el 2012 inicio sus estudios de Química Ambiental en la facultad de ciencias de la Universidad de Chile, donde tuvo la oportunidad de cursar diversas asignaturas según su interés en el campo de la ciencia, los deportes y la música.

Finalizo sus estudios de pregrado el año 2017, e inicio su seminario de Título con el profesor Fernando Santibáñez en el centro de investigación AGRIMED perteneciente a la facultad de Agronomía de la Universidad de Chile. Durante los dos años siguientes tomo el rol de ayudante las asignaturas de Introducción a las ciencias ambientales, Química Ambiental y Biogeoquímica, junto con continuar con sus estudios musicales en la ejecución de Trombón.

*Para aquellas personas que
me han acompañado en mi camino kármico*

AGRADECIMIENTOS

Quisiera agradecer a mi familia por su constante apoyo y cariño, a mis amigos por su fundamental rol de contención y compañerismo; y a todos mis profesores a lo largo de estos 23 años de instrucción.

También a la gente de AGRIMED por recibirme tan amablemente y brindarme tanto apoyo, al profesor Fernando Santibáñez por darme la oportunidad de trabajar bajo su tutela y a la profesora Sylvia Copaja por sus correcciones y fundamentales consejos.

Y finalmente al azar del destino por darme la oportunidad de extraer todo el meollo de la vida.

INDICE GENERAL

BIOGRAFIA.....	ii
AGRADECIMIENTOS.....	iv
INDICE GENERAL.....	v
INDICE DE TABLAS	x
INDICE DE FIGURAS	xii
RESUMEN	xv
ABSTRACT.....	xvii
I. INTRODUCCION	1
1.1 Estado general de la problemática.....	1
1.2. Cuenca hidrográfica y el enfoque de gestión integrada.	2
1.3 Suelo como recurso natural y los servicios asociados.....	4
1.4 Degradación de suelo	6
1.5 Erosión hídrica.....	7
1.5.1 Mecánica de Erosión hídrica	7
1.5.2 Factores que determinan la erosión hídrica	8
1.6 Los modelos para evaluar la degradación del suelo.	10
1.7 Modelo paramétrico de la ecuación universal de perdida de suelos (USLE).....	11
1.8 Sistema de Información Geográfica (SIG) y su aplicación a USLE.	13
1.9 Área de estudio	14

1.9.1	Clima del área de estudio	15
1.9.2	Suelos del área de estudio	16
1.9.3	Gobernación de la Cuenca de Rapel.....	21
1.9.4	Actividades económicas	23
1.9.5	Áreas bajo Protección Oficial y Conservación de la Biodiversidad.....	24
1.10	Objetivos	26
1.10.1	Objetivo General	26
1.10.2	Objetivos específicos.....	26
II.	FACTOR R. EROSIVIDAD DE LA PRECIPITACION.....	27
2.1	Método de Cálculo.	27
2.2	Limitación del área de estudio en la cuenca de Rapel	30
2.3	Análisis de la erosividad de la precipitación	31
2.3.1	Análisis erosividad de la precipitación a escala de cuenca	32
2.3.2.	Análisis erosividad de la precipitación a nivel comunal	33
III.	FACTOR K. ERODABILIDAD DEL SUELO.....	35
3.1	Ordenes de suelos en la cuenca de Rapel	36
3.1.1	Alfisoles	36
3.1.2	Molisoles	36
3.1.3	Inceptisoles.....	37
3.1.4	Vertisoles.....	38

3.1.5 Entisoles	38
3.2 Método de Calculo	39
3.3 Análisis de la erodabilidad del suelo	43
3.3.1 Análisis de erodabilidad a escala cuenca	44
3.3.2 Análisis erodabilidad a nivel comunal	53
IV. FACTOR LS. LONGITUD DE LADERA Y ESCARPADO DE PENDIENTE.....	58
4.1 Método de calculo.....	58
4.2 Análisis de resultado	62
4.2.1 Análisis factor topográfico escala de cuenca	62
4.2.2 Análisis factor topográfico nivel comunal	64
V. FACTOR C. CUBIERTA VEGETAL.....	67
5.1 Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada	68
5.2 Método de calculo.....	68
5.3 Análisis de las variaciones del factor C.....	72
5.3.1 Análisis cubierta vegetal a nivel de cuenca	74
5.3.2 Análisis cubierta vegetal a nivel comunal	76
VI. FACTOR P. PRACTICAS DE CONSERVACION DE SUELO.....	78
6.1 Método de Calculo	78
6.2 Análisis de la distribución del factor P	80
6.2.1 Análisis factor practica de conservación escala cuenca	80

6.2.2 Análisis factor practica de conservación escala comunal	82
VII. PERDIDA DE SUELO DEBIDO A LA EROSIVIDAD DE LA PRECIPITACION EN ZONAS CULTIVABLES.	87
7.1 Razón de perdida de suelo a escala de cuenca de Rapel	87
7.1.1 Razón perdida de suelo sin practica de conservación.....	87
7.1.2 Razón de perdida de suelo con practica de conservación	91
7.1.3 Análisis comparativo del uso y no uso de la práctica de conservación Curvas de nivel .	93
7.2 Razón de perdida de suelo a escala comunal.....	94
7.2.1 Razón de pérdida de suelo sin practica de conservación.....	94
7.2.2 Razón de pérdida de suelo con practica de conservación	97
7.2.3 Análisis comparativo del uso y no uso de la práctica de conservación Curvas de nivel, a escala comunal.....	99
7.3 Cuantificación de superficie perdida por comuna	100
7.3.1 Superficie perdida de suelo cultivable por comuna.....	101
7.3.2 Proporción de suelo cultivable perdido	103
VIII. CONCLUSIONES	106
IX. REFERENCIAS.....	109
ANEXO A. ASPECTOS SOBRE EL SUELO.....	115
A.1. Composición del Suelo	115
A.1.1 Fase Sólida.....	115
A.1.2 Fase Líquida y Fase Gaseosa	118

A.2. Propiedades físicas del suelo	118
A.2.1 Textura	118
A.2.2 Estructura	119
A.3. Tipos de erosión hídrica	121
ANEXO B. ASPECTOS SOBRE SISTEMAS DE INFORMACION GEOGRAFICA	123
B.1. Modelos cartográficos.....	123
B.1.1 Modelo vectorial	123
B.1.2 Modelo Raster	124
B.1.3 Comparación entre modelos.....	125
B.2. Modelo de elevación digital (DEM).....	125
B.3. Imágenes Satelitales Landsat 8.....	127
B.3.1 Respuestas y bandas espectrales.....	127
B.3.2 Cuadrícula Landsat	129

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Principales causas de la cuenca de Rapel.....	15
Tabla 2 Asentamientos pertenecientes a la cuenca de Rapel.....	22
Tabla 3 Superficie cultivada (ha) de los principales cultivos de la cuenca de Rapel (INE 2007)	23
Tabla 4 Código para tipo de estructura y permeabilidad.....	40
Tabla 5 Series de suelo para la Región del Libertador General Bernardo O´Higgins	42
Tabla 6 Rol de la Estructura en la Erosión hídrica según la erodabilidad del suelo Ecuación 9.....	44
Tabla 7 Rol de la Permeabilidad en la Erosión hídrica según la erodabilidad del suelo Ecuación 9	44
Tabla 8 Valores ponderados del orden Alfisol de la cuenca de Rapel	45
Tabla 9 Valores ponderados del orden Molisol de la cuenca de Rapel	47
Tabla 10 Valores ponderados del orden Inceptisol de la cuenca de Rapel.....	48
Tabla 11 Valores ponderados del orden Vertisol de la cuenca de Rapel.....	50
Tabla 12 Valores ponderados del orden Entisol de la cuenca de Rapel.....	52
Tabla 13 Factor P para practica de conservación de curvas de nivel.....	79
Tabla 14 Presencia en porcentaje del valor P en la cuenca de Rapel	81
Tabla 15 Presencia en porcentaje del valor P en la comuna de Olivar	84
Tabla 16 Presencia en porcentaje del valor P en la comuna de Machalí.....	85
Tabla 17 Perdida de suelo para la cuenca de Rapel sin uso de practica de conservación.....	89
Tabla 18 Perdida de suelo para la cuenca de Rapel con uso de practica de conservación.....	92
Tabla 19 Comparación en rango de perdida de suelo de la superficie cultivable según uso y no uso de la práctica de conservación Curvas de nivel en la cuenca de Rapel.....	93
Tabla 20 Número de comunas según el intervalo de riesgo en escenario sin practica de conservación	96

Tabla 21	Número de comunas según el intervalo de riesgo en escenario con practica de conservación	98
Tabla 22	Superficie cultivada por comuna	101
Tabla 23	Superficie de suelo perdida anualmente por comuna según el uso y no uso de practicas de conservación	102
Tabla 24	Porcentaje de suelo cultivable perdido anualmente.....	104
Tabla 25	Clasificación de partículas minerales.....	116
Tabla 26	Clasificación de materia orgánica según Walkley - Black	117
Tabla 27	Bandas espectrales Landsat 8 OLI-TIRS	128

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 Servicios ecosistémicos del suelo.....	4
Figura 2 Esquematzación sobre los procesos que dan cuenta de la erosión hídrica.	8
Figura 3 Esquematzación en capas del estudio espacial del territorio	13
Figura 4 Principales causas cuenca Rapel	15
Figura 5 Relación entre valor R calculado y el promedio anual de precipitaciones.	29
Figura 6 Precipitaciones promedio anuales de la cuenca de Rapel	30
Figura 7 Delimitación del área de estudio de la cuenca de Rapel	30
Figura 8 Mapa Factor R. Erosividad de la precipitación a escala cuenca.	32
Figura 9 Histograma de valor R en cuenca de Rapel.....	33
Figura 10 Mapa Factor R. Erosividad de la precipitación a nivel comunal.....	34
Figura 11 Orden Alfisol en cuenca de Rapel.....	36
Figura 12 Orden Molisol en cuenca de Rapel.....	37
Figura 13 Orden Inceptisol en cuenca de Rapel.....	37
Figura 14 Orden Vertisol en cuenca de Rapel	38
Figura 15 Orden Entisol en cuenca de Rapel.....	38
Figura 16 Nomograma que resuelve la ecuación K.....	40
Figura 17 Series de suelo correspondiente a la Región libertador B. O'Higgins	41
Figura 18 Mapa factor K. Erodabilidad del suelo a escala de cuenca	45
Figura 19 Erodabilidad por series de suelo del orden Alfisol	46
Figura 20 Erodabilidad por series de suelo del orden Molisol	48
Figura 21 Erodabilidad por series de suelo del orden Inceptisol	49
Figura 22 Erodabilidad por series de suelo del orden Vertisol	51
Figura 23 Erodabilidad por series de suelo del orden Entisol	53

Figura 24	Mapa factor K. Erodabilidad del suelo a nivel comunal	54
Figura 25	Ordenes Molisol y Alfisol en la comuna de Malloa	55
Figura 26	Ordenes Alfisol, Molisol, Incetisol y Entisol en la comuna de Marchigüe.....	56
Figura 27	DEM cuenca de Rapel.....	60
Figura 28	{ a) Dirección de Flujo, b) Acumulación de flujo, c) Angulo de Pendiente	61
Figura 29	Mapa factor LS. Influencia del relieve en la erosión a escala cuenca	63
Figura 30	Mapa factor LS. Influencia de la topografía en la erosión a nivel comunal	64
Figura 31	Histograma de pendientes en grados de la comuna de Olivar	65
Figura 32	Histograma de pendientes en grados de la comuna de Alhué.....	66
Figura 33	Captaciones WRS-2 para Cuenca de Rapel.....	69
Figura 34	Imágenes RGB Landsat 8 de la cuenca de Rapel. Meses Mayo, Junio, Julio y Agosto	70
Figura 35	Imágenes NDVI de la cuenca de Rapel para los meses Mayo, Junio, Julio y Agosto.....	71
Figura 36	Imagen NDVI Invernal de la cuenca de Rapel.....	72
Figura 37	Mapa factor C. Influencia de la cubierta vegetal en la erosión a escala cuenca.....	73
Figura 38	Cuerpos de Agua en cuenca de Rapel	74
Figura 39	Terrenos desnudos de vegetación cuenca de Rapel	74
Figura 40	Terrenos con arbustos y prados en la cuenca de Rapel	75
Figura 41	Terrenos con espesa vegetación en la cuenca de Rapel	75
Figura 42	Mapa factor C. Influencia de la cubierta vegetal en la erosión a nivel comunas.....	76
Figura 43	Relación pendiente en grados y porcentaje.....	79
Figura 44	Mapa factor P. Influencia de la práctica de conservación en.....	81
Figura 45	Mapa factor P. Influencia de la práctica de conservación en la.....	83
Figura 46	Histograma de pendientes en porcentaje para la comuna de Olivar.....	86
Figura 47	Histograma de pendientes en porcentaje para la comuna de Machalí	86

Figura 48 Mapa de erosión de la cuenca de Rapel sin practica de conservación	88
Figura 49 Histograma de perdida de la cuenca de Rapel sin practica de conservación	90
Figura 50 Mapa de perdida de suelo de la cuenca de Rapel con practica de conservación	91
Figura 51 Histograma de perdida de suelo de la cuenca de Rapel con practica de conservación...	93
Figura 52 Mapa de razón de perdida de suelo a escala comunal sin practica de conservación.....	95
Figura 53 Mapa de razón de perdida de suelo a escala comunal con practica de conservación	97
Figura 54 Reducción de perdida de suelo en porcentaje	100
Figura 55 Perdida de suelo cultivable en superficie por año	102
Figura 56 Proporción de suelo cultivable perdido en porcentaje por año	104
Figura 57 Medio trifásico del suelo	115
Figura 58 Estructura Laminar	119
Figura 59 Estructura Prismoide	120
Figura 60 Estructura Blocosa	120
Figura 61 Estructura Esferoidal	120
Figura 62 Erosión por Salpicamiento.....	121
Figura 63 Erosión por lamina.....	121
Figura 64 Erosión por Surcos.....	121
Figura 65 Erosión por Zanjas	122
Figura 66 Cambio del formato analógico al digital.....	124
Figura 67 Modelo SIG Raster	125
Figura 68 Modelo SIG Vectorial.....	125
Figura 69 Diagrama comparativo de curvas hipsométricas	126
Figura 70 Respuesta espectral de algunas coberturas en las bandas del sensor OLI	128
Figura 71 Captaciones WRS-2 para Chile	129

RESUMEN

La erosión hídrica es un fenómeno natural que provoca el transporte del suelo y la pérdida natural del mismo, sin embargo si esta pérdida de suelo no es compensada por medio de su regeneración, las características de sustentar ecosistemas, de fertilidad y capacidad de sostener la agricultura se verán afectadas, implicando un desmedro del recurso natural suelo. La pérdida del recurso es debido a la aceleración de la erosión hídrica, estando este fenómeno estrechamente vinculado a las actividades antrópicas.

Debido a que no es posible desvincular el estudio de los recursos naturales a las actividades antrópicas, se ha desarrollado el concepto de sistemas socio-ecológicos; el cual pretende entender los sistemas sociales, biofísico y ecológicos como entes dinámicos y complejos que interactúan entre sí. Este enfoque es el más apropiado para estudiar la erosión hídrica.

La modelación de sistemas naturales juega un rol fundamental para el análisis, comprensión y desarrollo de un plan de regulación del sistema. El estudio de modelos de sistemas naturales es complejo debido al gran número de interacciones que ocurren, implicando en el manejo de un volumen muy grande de información; para ello el uso de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) es fundamental.

Uno de los modelos más ampliamente usados para predecir la pérdida de suelo debido a la erosión hídrica, corresponde al modelo paramétrico de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (USLE), la cual por medio de un producto simple pondera cada uno de los factores que están vinculados con la erosión hídrica. Estos factores corresponden a: Erosividad de la precipitación (R), Erodabilidad del suelo (K), Pendiente de ladera (S), Longitud de ladera (L), Cobertura vegetal (C) y Práctica de conservación (P).

El objetivo del presente trabajo recae en la implementación de un protocolo de cálculo basado en la USLE para modelar por medio de SIG la pérdida de suelo en la cuenca de

Rapel. Se eligió esta área de estudio a causa al alto riesgo económico que implica la degradación del suelo en esta zona altamente agrícola.

El análisis de resultados de razón perdida de suelo $\left(\frac{MG}{ha \cdot año}\right)$, se desarrolló a escala de cuenca y a escala comunal, además se realizó una comparación en la razón perdida de suelo según se aplique y no se aplique la práctica de conservación (P), en esta oportunidad se modeló la medida de conservación de *Curvas Nivel*.

Los resultados modelados a nivel de cuenca señalan una reducción del 21% en el promedio de perdida de suelo al aplica la medida de conservación; además se observó un aumento en la superficie de aquellos rangos de riesgos más bajos de perdida de suelo al aplicar la medida.

Los resultados modelados a nivel de comuna muestran una reducción en la perdida de suelo de todas las comunas al aplicar la medida de conservación, implicando que el 70% de ellas se encuentren en los dos rangos más bajos de riesgo.

Finalmente se puede concluir que la construcción de un protocolo de cálculo para el estudio de la perdida de suelo a escala de cuenca Hidrográfica, permite el aumento de conocimiento técnico para la toma de decisiones enfocada en la interacción de los componentes, permitiendo el aprovechamiento y la conservación de los recursos naturales.

ABSTRACT

Water erosion is a natural phenomenon that causes soil transport and natural loss, but if this soil loss is not compensated by its regeneration, the characteristics of sustaining ecosystems, fertility and capacity to sustain agriculture are will be affected, implicating in the detriment of the natural soil resource. The loss of the resource is due to the acceleration of water erosion, this phenomenon being closely linked to anthropogenic activities.

Because it is not possible to separate the study of natural resources from anthropogenic activities, the concept of socio-ecological systems has been developed; which aims to understand social, biophysical and ecological systems as dynamic and complex entities that interact with each other. This approach is the most appropriate to study water erosion.

The modeling of natural systems plays a fundamental role for the analysis, understanding and development of a system regulation plan. The study of natural systems models is complex due to the large number of interactions that occur, implying the handling of a very large volume of information; for this the use of Geographic Information Systems (GIS) is fundamental.

One of the most widely used models to predict the loss of soil due to water erosion, corresponds to the parametric model of the Universal Soil Loss Equation (USLE), which by means of a simple product weighs each one of the factors that they are linked to water erosion. These factors correspond to: erosivity of precipitation (R), soil erodability (K), slope slope (S), slope length (L), vegetation cover (C) and conservation practice (P).

The objective of this paper is to implement a calculation protocol based on the USLE to model the loss of soil in the Rapel basin through GIS. This study area was chosen because of the high economic risk involved in the degradation of the soil in this highly agricultural area.

The analysis of the results of the lost soil ratio $\left(\frac{MG}{ha \cdot año}\right)$, was developed at the scale of the basin and at the communal scale, and a comparison was made in the lost soil ratio as applied and the conservation practice (P) is not applied, in this opportunity the conservation measure of *Cultivation in contour lines*.

The results modeled at the basin level indicate a 21% reduction in the average soil loss when the conservation measure is applied; In addition, an increase in the surface of those lower risk ranges of soil loss was observed when applying the measure.

The results modeled at the commune level show a reduction in the loss of soil of all the communes when applying the conservation measure, implying that 70 % of them are in the two lowest risk ranges.

Finally, it can be concluded that the construction of a calculation protocol for the study of soil loss at the Hydrographic Basin scale, allows the increase of technical knowledge for decision making focused on the interaction of the components, allowing the exploitation and Conservation of natural resources

I. INTRODUCCION

1.1 Estado general de la problemática.

La degradación del suelo es uno de los aspectos ambientales más importantes de este siglo, ya que una mala calidad del recurso genera un impacto adverso sobre la productividad agrícola, el medio ambiente, la seguridad alimentaria y finalmente sobre la calidad de vida (Eswaran y col. 2001), lo cual da cuenta sobre la interconectada relación entre la sostenibilidad de los ecosistemas y el desarrollo socioeconómico.

Entre las causas más importantes de la degradación de los suelos se encuentra la erosión hídrica, la cual a pesar de ser considerada un proceso natural, suele verse agravada por diversas actividades humanas. Las prácticas de conservación de suelo permiten disminuir el efecto erosivo de las lluvias por medio del corte de las líneas de escorrentía en los cultivos, por lo que identificar cuantitativamente el efecto de las prácticas de conservación aumentará el conocimiento técnico para el cuidado del recurso natural suelo.

En la actualidad no existen estudios de erosión hídrica en la cuenca de Rapel, que estén enfocados en señalar la diferencia cuantitativa de pérdida de suelo, al aplicar y no aplicar medidas de conservación.

El desarrollo del presente trabajo influirá positivamente en el manejo adaptativo del recurso natural suelo, y permitirá tomar decisiones locales a nivel de cuenca hidrográfica para alcanzar soluciones socialmente aceptadas, equitativas y ambientalmente sostenibles en la cuenca de Rapel.

1.2. Cuenca hidrográfica y el enfoque de gestión integrada.

En el contexto de la gobernanza de las interacciones humano-ambiente, las soluciones locales a diferencia de las centralizadas, pueden generar resultados exitosos y sostenibles, especialmente donde la escala y las diferencias ecosistémicas son significativas y relevantes (Food 2007), (Ostrom 2009). Pero para ello es necesario el desarrollo de capacidades acumulativas que permitan diagnosticar los problemas y potencialidades de los vínculos entre humanos y ambiente, para lo cual el estudio de sistemas complejos, multivariados, no lineales y a múltiple escala es fundamental. En este contexto, el concepto de sistemas socio-ecológicos pretende entender los sistemas sociales y ecológicos como entes dinámicos y complejos que interactúan entre sí, por lo que solo pueden ser evaluados en sus interacciones y no como entes separados (Ostrom 2009)

Considerando la geografía montañosa de Chile, marcada por las cordilleras de Los Andes y La Costa, la forma más adecuada de abordar las interacciones socio-ecológicas es a través de la gestión integrada de cuencas hidrográficas, lo cual permitiría el análisis integral de las causas, efectos y posibles soluciones de los problemas; junto a la identificación y uso racional de las potencialidades de la cuenca (García-Ruiz y Col. 2005).

La cuenca hidrográfica es un concepto utilizado para designar un territorio, región o zona, cuya característica principal es que el agua de lluvia que cae en esa superficie y escurre hacia un cauce común que desemboca en un afluente más grande, en una laguna o en el mar, además esta superficie es delimitada por su propia naturaleza (Sánchez Vélez y Col. 2003). Esta área de drenaje está definida por límites físicos más o menos precisos, que reciben el nombre de líneas divisorias de aguas de la cuenca. En palabras simples, una cuenca es una unidad territorial delimitada por las cumbres de los cerros que dividen los cursos de agua y cuyos cursos confluyen hacia una salida o curso de agua común.

En la cuenca existen factores ecológicos, climatológicos, hidrológicos, sociales, económicos, culturales, etc. que interactúan entre sí y le confieren características propias a la cuenca (Food 2007). En consecuencia, la cuenca hidrográfica es un sistema dinámico y abierto, donde se ubican todos los elementos naturales y actividades que realiza el ser humano; allí interaccionan el sistema biofísico con el socioeconómico, estando estos en una dinámica integrada que permite valorar el nivel de intervención de la población y los problemas generados producto de la misma, desde los enfoques natural y antrópico simultáneamente (García-Ruiz y col. 2005).

En Chile la mayoría de las personas vive en cuencas hidrográficas, las cuales han visto transformados los ecosistemas naturales cuenca, debido al uso que de ellos han hecho la población. El proceso de gestión integrada de cuencas provee la oportunidad de tener un balance entre los diferentes usos que se le pueden dar a los elementos naturales y los impactos que estos usos tienen en la sostenibilidad de los elementos. Ello implica la interacción de los elementos naturales y la población de la cuenca, de ahí que se requiera la aplicación de las ciencias sociales y las ciencias naturales simultáneamente.

Al enfocarnos en los recursos naturales a lo largo de la cuenca, es posible observar que las variables físicas de los mismos, presentan un gradiente de cambio que provoca una serie de respuestas en los organismos constituyentes de la cuenca. Este fenómeno se traduce en continuos ajuste bióticos y abióticos que consistentes en carga, transporte, utilización y almacenamiento de materia, es decir, flujos de energía y materia que pueden pasar del ambiente terrestre al acuático (Vannote y col. 1980). Es en este contexto que el transporte de suelo por el agua juega un rol fundamental en la cuenca, ya sea favoreciendo o perjudicando los diversos sistemas presentes en la cuenca hidrográfica.

1.3 Suelo como recurso natural y los servicios asociados.

Se define al suelo como un sistema altamente complejo y dinámico, constituido por una capa superficial, relativamente delgada, de material más o menos disperso que se encuentra sobre la litosfera. De este material depende en buena parte el crecimiento de las plantas y la alimentación de los seres vivos, por lo cual corresponde a un recurso natural básico que sirve de enlace entre los

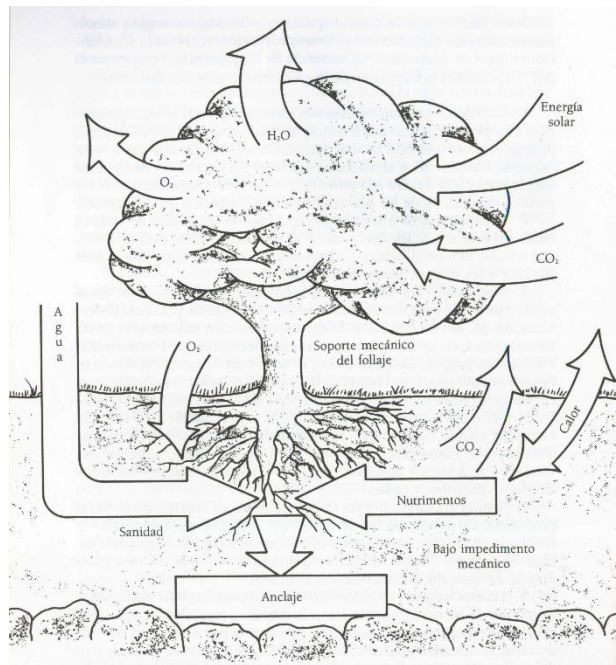


Figura 1 Servicios ecosistémicos del suelo.

factores bióticos y abióticos de los ecosistemas terrestres.

Actualmente es considerado un recurso no renovable en términos de escala temporal humana, por lo cual debe ser protegido para sustentar sus propiedades y funciones en el largo plazo.

Sobre este recurso variados procesos físicos, químicos y biológicos actúan simultáneamente para mejorar o empobrecer su condición y funciones, las cuales son desempeñadas en beneficio de las plantas que crecen en él. Las funciones o servicios ecosistémicos que brinda el suelo, se pueden observar esquemáticamente en la Figura 1 y son los siguientes.

La protección del sistema radical, junto con facilitar una fotosíntesis más eficiente, también juega un rol de soporte mecánico no tan resistente que permite la penetración, favoreciendo el crecimiento de las partes subterráneas de la planta (Narro Farías 1994).

El suelo actúa como reservorio de agua en cantidades adecuadas y con alta disponibilidad para las plantas, es decir, con un alto potencial hídrico (Narro Farías 1994).

El suelo aporta nutrientes en forma de especies químicas en cantidades adecuadas que permitan mantener el crecimiento sano. Los nutrientes entran en contacto con las superficies de absorción en las células radicales, debido a los procesos de difusión, flujo de masa o intercepción por crecimiento radical. Las condiciones físicas del suelo están estrechamente relacionadas con su fertilidad; los suelos más fértiles contienen cantidades significativas de materia orgánica (MO) y de arcilla, factores que influyen fuertemente sobre la capacidad de retención de humedad y sobre la capacidad de intercambio catiónico (Narro Farías 1994).

El suelo participa del intercambio de gases que asegura el oxígeno para las raíces. Cabe señalar que de la respiración de las raíces depende en buena parte la absorción de nutrientes y agua, y por implicancia el crecimiento vegetal. El aire del suelo se renueva por difusión de gases y por flujo de masa, procesos dependientes de las características físicas del suelo (Narro Farías 1994).

El suelo proporciona una temperatura adecuada para el desarrollo de raíces y germinación de semilla. Esta función está estrechamente ligada con la densidad aparente, porosidad y contenido de humedad del suelo, esto es debido a que el calor se transporta en el suelo principalmente por conducción (Narro Farías 1994).

Los servicios ecosistémicos que prestan los suelos están en directa relación con sus características físicas, es por ello que la comprensión de su composición permitirá dilucidar el funcionamiento de sus funciones.

1.4 Degradación de suelo

La degradación del suelo se puede definir como el cambio de una o más de sus propiedades a condiciones inferiores a las originales, por medio de procesos físicos, químicos y/o biológicos (Saintraint y Sloom 1993).

En términos generales, la degradación del suelo provoca alteraciones negativas de uno o varios de los servicios y/o funciones ecosistémicas ambientales, implicando en la disminución del nivel de fertilidad del suelo y consecuentemente en su capacidad de sostener una agricultura productiva. Es por ello por lo que la identificación de las causas de deterioro del recurso es fundamental para su protección.

La erosión acelerada o antrópica es una de las principales causas de la degradación del suelo, y corresponde a un proceso acelerado de la remoción natural del suelo debido a la destrucción de la vegetación natural que lo protege al de la acción de las aguas lluvia.

La erosión natural o geológica, constituye al fenómeno natural de remoción física del suelo por la acción del impacto de caída de las gotas de lluvia, energía del flujo superficial y subterráneo, hielo, velocidad del viento y fuerza de la gravedad (Guevara 1997) .

Se define a la erosión de la superficie terrestre como un proceso geomorfológico dinámico que, junto a otros procesos denudativos tales como la meteorización y la remoción en masa, actúa permanentemente sobre el relieve terrestre, de tal forma de allanar las superficies hasta una condición de equilibrio estático (Flores y Col. 2010).

En Chile los factores naturales que inciden en el deterioro del suelo son principalmente: la topografía montañosa que se extiende en la mayor parte del territorio nacional (Saintraint y Sloom 1993) y la elevada erosividad dada por la disminución irregular y concentrada de las precipitaciones en la zona centro sur de Chile (Ellies 2000).

1.5 Erosión hídrica

La erosión hídrica resulta de la alteración de la superficie del suelo por el agua que fluye y los materiales que esta transporta. Una parte del proceso erosivo es el desprendimiento de las partículas de suelo debido al impacto de las gotas de agua que dan forma al escurrimiento superficial, y que finalmente transporta las partículas de suelo a otros sitios. En este proceso ocurre la separación de los agregados del suelo (pellets) en partículas individuales (arcillas, limo y arena) por el agua, provocando la destrucción de la estructura del suelo. (Anexo A.3, Tipos de Erosión hídrica)

1.5.1 Mecánica de Erosión hídrica

El proceso de erosión hídrica muestra una mecánica compleja, la cual está regida por una serie de factores que determinan la magnitud de la perturbación, tales como el clima, la topografía, el suelo, la vegetación y la acción antrópica (Guevara 1997).

Como consecuencia de la desagregación se produce un sello superficial que disminuye sustancialmente la capacidad de infiltración del suelo (Saintraint y Sloom 1993). En el momento en que la precipitación pasa a ser mayor que la tasa de infiltración de agua en el suelo, se produce la retención y detención superficial del agua, la cual posteriormente se traduce en escurrimiento superficial o inundaciones (anegamiento) (Saintraint y Sloom 1993).

Se considera la escorrentía superficial como el principal agente de transporte del suelo, por lo cual los procesos de erosión hídrica están estrechamente relacionados con las rutas que sigue el agua en su paso a través de la cobertura vegetal y su movimiento sobre la superficie

del suelo. La ausencia de vegetación agrava el proceso erosivo, ya que la presencia de raíces influye aumentando la estabilidad de los agregados del suelo y la propia coherencia del suelo, protegiéndolo del impacto de las gotas de agua, incrementando la capacidad de infiltración y frenando la esorrentía (Thornes 1985).

Existe un límite definido para la cantidad de sedimentos que puede ser transportado en suspensión durante la esorrentía. Cuando se ha alcanzado este límite, el agua no puede llevar más materiales sin acelerar la velocidad o aumentar la profundidad del cauce, por lo cual cualquier disminución en estas variables determinará la sedimentación. La Figura 2 muestra un bosquejo sobre los procesos que conforman la mecánica de la erosión hídrica.

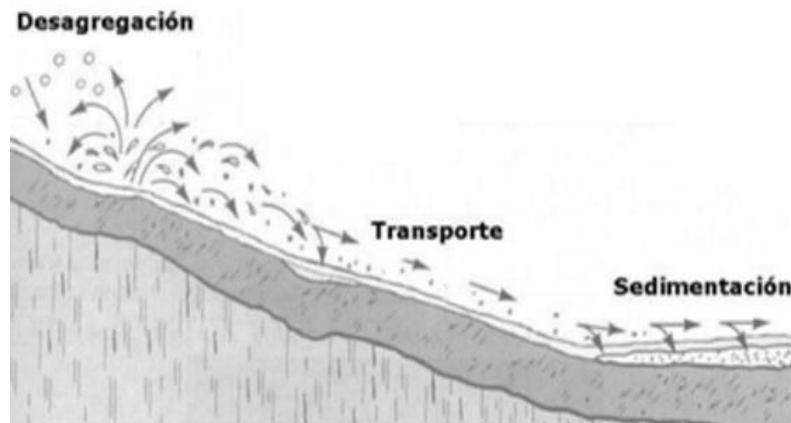


Figura 2 Esquemmatización sobre los procesos que dan cuenta de la erosión hídrica.

1.5.2 Factores que determinan la erosión hídrica

La mecánica de la erosión hídrica está regida por una serie de factores, lo cuales son parámetros naturales o artificiales que determinan la magnitud de la perturbación, tal como clima, topografía, suelo, vegetación y manejo (acción antrópica) (Guevara 1997). Los principales factores son:

Clima

Precipitación, evaporación, temperatura, viento y humedad relativa constituyen los elementos climáticos más importantes que interaccionan con el suelo (Bennett 1965). De estos elementos el que tiene más importancia es la precipitación, y su acción corresponde a la cantidad de agua caída, la época del año en que esta cae, su intensidad y la duración (Guevara 1997).

Topografía

Las características topográficas que ejercen una marcada influencia sobre la erosión son; el grado de inclinación, longitud y forma de la pendiente, y tamaño y forma de la cuenca (Guevara 1997). La erosión aumenta con frecuencia cuando la longitud de la pendiente es mayor.

Erodabilidad del suelo

La erodabilidad del suelo corresponde a la susceptibilidad que este tiene a ser erosionado (Guevara 1997). La resistencia de un suelo a la erodabilidad depende de su posición topográfica, pendiente y grado de alteración. Este factor varía con la textura del suelo, la estabilidad de los agregados, la resistencia al esfuerzo cortante, la capacidad de infiltración y los contenidos minerales y orgánicos

Vegetación

El manto vegetal influye sobre la proporción del escurrimiento del agua de lluvia y del arrastre del suelo más que cualquier otro factor físico por separado (Bennett 1965).

Los agregados estructurales del suelo se unen entre sí gracias a las raíces de las plantas y las hifas de los hongos, de manera que se crea una estructura compleja de raíces y agregados del suelo que puede perdurar incluso cierto tiempo después de ser eliminada la parte aérea de las plantas (Tisdall y Oades 1982). El efecto mecánico de la cohesión

producida por las raíces es muy importante no sólo frente a la erosión por salpicadura y por escorrentía sino también frente a otros tipos de erosión.

Manejo

Las actividades antropogénicas se manifiestan a través del mal uso de los recursos naturales. Entre las actividades humanas relacionadas con la erosión se incluyen la agricultura, pastoreo, minería, silvicultura, recreación, urbanismo y vialidad, entre otras (Guevara 1997).

1.6 Los modelos para evaluar la degradación del suelo.

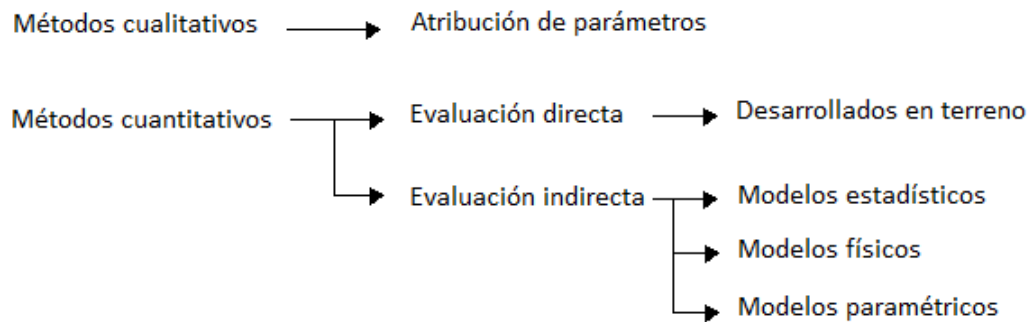
En el amplio escenario científico, los modelos pueden ser reconocidos por el gran potencial para las investigaciones en las ciencias en general; pero cuando son aplicados a un sistema natural, la modelación juega un rol fundamental para el análisis, comprensión y desarrollo de un plan de regulación del sistema.

En específico para las ciencias del suelo, los modelos pueden ser utilizados como herramientas de predicción de la pérdida de suelos, para planes de conservación, desarrollo de proyectos e inventarios de erosión; y para la ordenación del recurso (Lal 2017).

Dentro de los métodos de evaluación de erosión, se puede encontrar dos enfoques de modelación, el cualitativo y el cuantitativo, siendo los primeros enfocados en la atribución de parámetros o baremos. Los *modelos cuantitativos* permiten la estimación numérica de la erosión y pueden tener una evaluación directa o indirecta, la evaluación directa se desarrolla en terreno por medición en parcelas de erosión o por la medición de variables, por otra parte, los métodos de evaluación indirecta están asociados a modelos que son representaciones simplificadas de la realidad; entre estos se pueden distinguir modelos estadísticos, modelos físicos y modelos paramétricos (Almorox Alonso 1994).

Los *modelos paramétricos* son formulaciones empíricas que pretenden interpretar los mecanismos erosivos por sus causas y efectos. El modelo paramétrico de evaluación de erosión hídrica con mayor aceptación y más amplia aplicación es la ecuación universal de pérdida de suelos (USLE).

A continuación se muestra un esquema resumen de lo descrito anteriormente.



1.7 Modelo paramétrico de la ecuación universal de pérdida de suelos (USLE).

La ecuación universal de pérdida de suelos (USLE) (Wischmeier, Smith, y Col 1978), estima las pérdidas de suelo anuales como valor promedio de un periodo representativo de años, que se producen en una superficie de terreno debido a la erosión superficial, laminar o regueros, ante unas determinadas condiciones de clima, suelo relieve, vegetación y usos de suelo. Este modelo es ampliamente utilizado debido a su simplicidad para el estudio de la erosión del suelo por el agua, a pesar de algunos inconvenientes debido a su gran requerimiento de datos de entrada.

La fórmula general de USLE considera condiciones estándar para su evaluación, tales como una parcela de 22,1m de longitud de declive y 9% de pendiente, mantenida en barbecho continuo y labrada siguiendo la línea máxima de pendiente, y se define como:

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P$$

Ecuación 1

Los factores de la formula general se definen como:

A, es la perdida de suelo por unidad de área, expresada en las unidades de K y por el periodo seleccionado para R. En la práctica, usualmente se calcula A en mega gramos por hectárea en años $\left(\frac{Mg}{ha \cdot año}\right)$.

R, factor de la erosividad de la precipitación. Se suele asociar también con un factor para la escorrentía de deshielo o del agua aplicada, en lugares donde la escorrentía es significativa. Usualmente se describe este factor en unidades de $\left(\frac{MJ \cdot mm}{ha \cdot hora \cdot año}\right)$.

K, factor de vulnerabilidad del suelo a la erosión o bien erodabilidad del suelo. Es la tasa de perdida de suelo por unidad de índice de erosión pluvial (R), cuando las condiciones de relieve y de vegetación son estándar. Este factor corresponde a una característica propia del suelo ligada a su granulometría, porosidad y condiciones hidrológicas. Usualmente se describe este factor en unidades de $\left(\frac{Mg}{ha}\right) \cdot \left(\frac{MJ \cdot mm}{ha \cdot hora}\right)^{-1}$

L, factor de longitud de ladera. Es la razón de perdida de suelo entre una longitud estándar (22,1m) y una longitud de pendiente de campo definida.

S, factor de lo escarpado de la pendiente. Es la razón de perdida de suelo entre el gradiente de pendiente de campo y el 9% de pendiente, bajo idénticas condiciones de pastura y labranza.

C, un factor de cubierta vegetal. Es la razón de perdida de suelo entre un área con idénticas condiciones de labranzas y pastura, y un área con condiciones específicas de cobertura y gestión.

P, factor de prácticas de conservación de suelos. Es la razón de pérdida de suelo entre una práctica de apoyo definida, tal como contorneado, cultivo de tiras o terrazas, y una de cultivo en hilera recta hacia arriba y abajo de la pendiente.

1.8 Sistema de Información Geográfica (SIG) y su aplicación a USLE.

En los últimos años, el Sistema de Información Geográfica (SIG) y la Teledetección se han utilizado ampliamente para la gestión de recursos naturales y la investigación de desastres, esto es debido a que este tipo de investigación requiere mucha información, siendo el SIG capaz de manejar fácil y eficientemente el gran tamaño de datos. Por esta razón, el uso de estas técnicas ha sido ampliamente adoptado y actualmente existen varios estudios que muestran el potencial de las técnicas de teledetección integradas con SIG en el mapeo de la erosión del suelo.

Una predicción espacial precisa proporciona no solo estimaciones de población no sesgadas (estimación global media) sino también estimaciones fiables (Wang y Col. 2002). Las aplicaciones del modelo USLE con SIG permite analizar la erosión del suelo con mucho más detalle ya que el proceso erosivo tiene un carácter de distribución espacial.

En ciencias geográficas, el estudio del territorio se realiza a través de distintas capas y temáticas, como lo muestra la Figura 3. La gran ventaja de los SIG es que pueden relacionar las distintas capas entre sí, lo que concede a estos sistemas unas espectaculares capacidades de análisis,

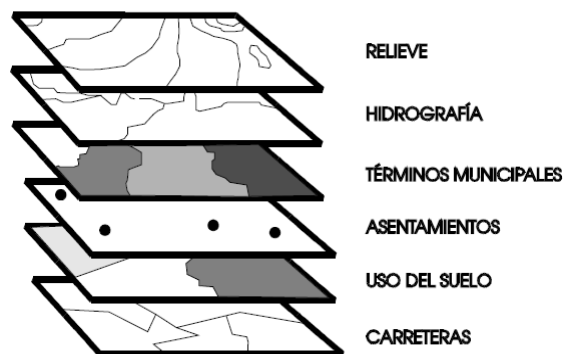


Figura 3 Esquematización en capas del estudio espacial del territorio

pudiendo responder a peticiones complejas y, por ello, producir mapas derivados que pueden representar situaciones reales o escenarios hipotéticos o simulados de gran utilidad (CEBRIAN 1988).

Los datos geográficos espaciales constan de dos componentes, el espacial y el temático, siendo el primero el encargado de señalar la localización absoluta (sistemas de

coordenadas) o bien la localización topológica (avenidas, calles etc.). Por otra parte, el componente temático indica variables o atributos de las entidades que se pueden estudiar según nuestra disciplina, por ejemplo, el componente temático para la entidad del medio físico podría ser litología, relieve, clima, vegetación etc.

Según sea la forma de organizar y contener estos componentes (los elementos espaciales y sus atributos temáticos), se puede hablar de dos modelos de SIG, con ventajas e inconvenientes que determinarán el uso de uno u otro de acuerdo la naturaleza de las investigaciones. Estos modelos corresponden al modelo *Vectorial* y el modelo reticulado o también denominado *Raster*. (Anexo B.1, Modelos cartográficos)

1.9 Área de estudio

El presente estudio se desarrolla en la cuenca hidrográfica de Rapel, la cual forma parte de la Región del General Libertador Bernardo O'Higgins, y se sitúa entre los paralelos 33°53' y 35° 01' de latitud sur, y entre los 70° 02' longitud Oeste.

La cuenca de Rapel drena una superficie total de 13.695 Km^2 , los cuales están repartidos en zonas de relieve de Cordillera de los Andes, depresión intermedia y Cordillera de la costa. Los principales causes que conforman esta cuenca se muestran en la Figura 4 Principales causes cuenca Rapel, y corresponden a los señalados en la Tabla 1.

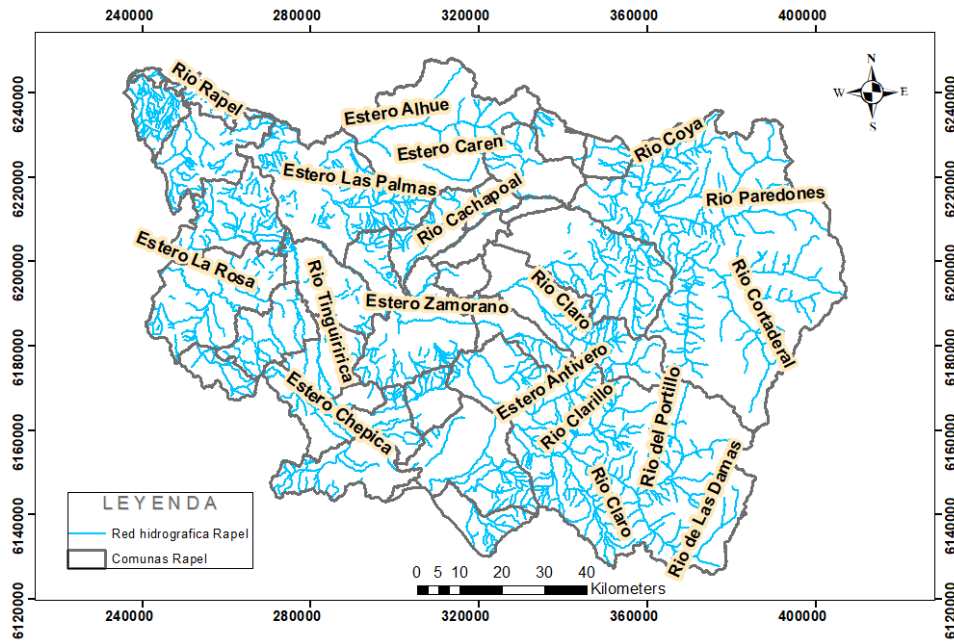


Figura 4 Principales causas cuenca Rapel

Tabla 1. Principales causas de la cuenca de Rapel.

Río Rapel	Río Cachapoal	Río Tinguiririca
Estero Alhué	Río Claro de Rengo	Río Claro (Tinguiririca)
Estero Zamorano	Estero La Cadena	Estero Carén
Estero Coya	Estero Chimbarongo	Río Pangal

El Río Rapel se forma a partir de la unión de los Ríos Cachapoal y Tinguiririca, en el lugar denominado La Junta, a unos 6 km al oeste de la localidad de Las Cabras. La confluencia tiene lugar en el interior de la Cordillera de la Costa y se encuentra hoy inundada por las aguas del embalse Rapel.

1.9.1 Clima del área de estudio

El clima predominante corresponde a *clima templado mediterráneo*, el cual presenta variaciones de oeste a este. En la costa se presenta nuboso, mientras en el sector de la depresión intermedia predomina un clima templado de tipo mediterráneo cálido con una

estación seca de seis meses y un invierno lluvioso. Sobre los 3.500 msnm el clima cambia a clima frío de altura con predominio de nieves eternas.

Las precipitaciones medias anual registradas en el sector costero de la cuenca alcanzan valores aproximados de 638 $\left(\frac{mm}{año}\right)$ y temperaturas de 14°C. Por efectos del relieve, en el sector centro de la cuenca, se presentan áreas de mayor sequedad y medias menores de precipitaciones que alcanzan los 406 $\left(\frac{mm}{año}\right)$. En sectores más elevados, las precipitaciones aumentan alcanzando valores medios anuales de 686 mm en la localidad de Coya y temperaturas medias anuales de 9,6°C en Sewell (Instituto de Asuntos Públicos 2003).

En general, los valores registrados de precipitación son mayores durante las temporadas invernales especialmente durante los meses de junio, julio y agosto.

1.9.2 Suelos del área de estudio

Durante el cuaternario, perteneciente a la Era geológica Cenozoica, quedó definido el relieve actual de la Zona, esto es, la presencia de una Depresión Intermedia, la Cordillera de Los Andes y la Cordillera de la Costa. Paralelamente se generaron las planicies litorales y las terrazas marinas (Leighton 2010).

Los materiales acarreados desde la alta Cordillera de Los Andes, ya sea por medio de las masas de hielo, en forma de lahares o bien como arrastres aluviales, fueron depositados en la Depresión Intermedia. Estos procesos de arrastre disminuyeron la altura de las montañas, formando amplios valles por donde escurrieron los actuales ríos. Al mismo tiempo, esos sedimentos transportados conformaron el relleno de la Depresión Intermedia, dando origen a los materiales de partida para los suelos de la región (Leighton 2010)

En la actualidad se puede observar una notoria diferencia en los regímenes de lluvia, humedad y oscilación térmica entre la costa, la depresión intermedia y los sectores

cordilleranos (DGA 2004); lo cual sumado a las peculiaridades de los materiales parentales, los suelos de la cuenca de Rapel presentan una gran variación en sus características principales. A continuación se describen las principales particularidades de los suelos según sector, en la cuenca de Rapel.

1.9.2.1 Suelos de los sectores cordilleranos

Este sector comprende las áreas de la Cordillera de Los Andes en las zonas ubicadas entre el límite de las nieves eternas y la línea de la vegetación de altura. Los procesos pedogénicos en estos sectores, no han tenido la intensidad suficiente para dar origen a suelos con clara diferenciación de horizontes, y la granulometría está dominada por la fracción arena, cuyo origen se encuentra en rocas andesíticas y basálticas (Leighton 2010).

1.9.2.2 Suelos de los sectores de precordillera de Los Andes

Corresponde a áreas ubicadas en los primeros cordones de la Cordillera de Los Andes y algunos cerros que se extienden, como prolongaciones de ella, hacia la Depresión Intermedia (Leighton 2010).

En estas zonas dominan dos posiciones geomorfológicas en las que se han desarrollado suelos característicos: Los cerros, piedmonts y planos aluvio-coluviales, y Terrazas aluviales asociadas a los valles de los ríos que bajan de la Cordillera. (Leighton 2010).

1.9.2.3 Suelos de la Depresión Intermedia

Corresponde a un Graben o depresión del relieve plano a moderadamente ondulado, el cual está formado entre la Precordillera de los Andes y los cerros de la Cordillera de la Costa. No constituye una unidad geomorfológica continua, sino que está formada por una serie de cuencas de origen tectónico de diferentes dimensiones, hidrografía, altura y características edáficas. Las cuencas están rellenas con sedimentos fluviales, glaciales,

fluvio-glaciales y volcánicos, a partir de los cuales se han desarrollado los suelos del sector (Leighton 2010).

Suelos de terrazas aluviales

Corresponde a suelos planos, con pendiente entre 2 y 3%. Presentan un desarrollo de abanico aluvial de grandes extensiones en valles amplios, tales como los asociados a los ríos Cachapoal y Tinguiririca. La profundidad de estos suelos es muy variable, desde los delgados que presentan una profundidad menor a 50cm, hasta los profundos de más de 100 cm.

Con respecto a su estructura, son muy homogéneos, con presencia de bloques subangulares mediano y finos. Desde el punto de vista taxonómico, los órdenes que se han descrito son Alfisol, Entisol, Mollisol e Inceptisol.(Leighton 2010).

Suelos en posiciones de piedmont

Estos suelos ocupan planos inclinados, correspondientes a coluvios y piedmonts, de pendientes moderadas, en una posición intermedia entre los cerros más escarpados y los suelos de valles aluviales. Las pendientes más frecuentes son de 1 a 3%, de 2 a 5% hasta de 3 a 8%. Con respecto a la profundidad, la mayoría son de moderadamente profundos a profundos, y su estructura dominante es de bloques subangulares medios (Leighton 2010).

De acuerdo a la clasificación taxonómica, se han identificado los órdenes Molisol, Inceptisol, Alfisol y Entisol.

Suelos en cuencas de sedimentación lacustre.

Los suelos que se encuentran en esta posición ocupan las partes más deprimidas del paisaje, ya sean planos de inundación, cuencas de sedimentación o bien terrazas aluviales antiguas en las posiciones más bajas del paisaje.

Corresponde a suelos que presentan una topografía plana (0-1%) o casi plana (1-3%). Con respecto a la profundidad, la mayoría de estos suelos han sido descritos como moderadamente profundos (75-100cm) y profundos (100-150cm) ; la estructura de estos suelos es buena, ya sea de bloques o prismática moderada o fuerte en horizontes superficiales (Leighton 2010).

Al considerar la clasificación taxonómica de los suelos, se puede apreciar que la mayoría se han clasificado en dos Órdenes, Vertisol y Mollisol, y en menor proporción, como Inceptisol y Alfisol.

Suelos sobre toba o brecha volcánica.

Los suelos que presentan esta capa limitante no presentan geomorfología definida en el paisaje, por lo cual la posición de estos no es homogénea. A raíz de la presencia de la capa limitante, los suelos varían entre ligeramente profundos y delgados. La estructura es de bloque subangulares en superficie y alcanza un grado de no estructura (maciza) en los horizontes más profundos (Leighton 2010).

Los Órdenes Alfisol y Mollisol son los más representativos en este grupo de suelos.

Suelos sobre sedimentos fluvioglaciares.

Estos suelos ocupan posiciones en el paisaje del tipo lomajes suaves, terrazas remanentes, terrazas aluviales y más raramente cuencas sedimentarias. Por esta razón no se encuentran suelos planos, sino que la mayoría de ellos presenta pendientes de 2 a 5% y 5 a 8%.

Estos suelos han sido descritos como moderadamente profundos y profundos, desde 100 a 155 cm. Con respecto a la estructura, domina los bloques subangulares a través de todos los perfiles (Leighton 2010).

Desde el punto de vista taxonómico, la taxa más representativa son los Xeralfs, seguido por Xerepts.

Suelos de origen volcánico

La mayoría de estos suelos se encuentra en posición de lomajes suaves, con pendiente de 2 a 5% y hasta 5 a 8%, además se han identificado como profundos, de 150 cm o más. Los suelos de origen volcánico se caracterizan por ser muy homogéneos, presentando estructuras de bloques subangulares medios moderados, la cual es muy uniforme entre horizontes (Leighton 2010).

Taxonomicamente todos se clasifican como Haploxerands.

1.9.2.4 Suelos de los cerros de la Cordillera de la Costa

La topografía de estos suelos presenta frecuentemente pendientes de 30 a 50%, lo cual es típico para formaciones de cerros. Con respecto al sustrato, este corresponde a roca granítica con diferentes grados de meteorización, o bien gravas de origen granítico ricas en cuarzo.

La profundidad de los suelos no es superior a los 100cm a pesar de la antigüedad de los mismos, lo cual se correlaciona con los intensos procesos de erosión a los que se encuentra sometida la mayor parte de la Cordillera de la Costa. La estructura de estos suelos es comúnmente de bloques subangulares medios y gruesos fuertes.

Desde el punto de vista taxonómico, estos suelos son considerados principalmente como Xeralfs.

1.9.3 Gobernación de la Cuenca de Rapel

Según la división política, la cuenca de Rapel ocupa casi la totalidad de la VI Región del General Libertador Bernardo O'Higgins, alcanzando una superficie de 17.145 Km² (Flores et al. 2010) alcanzando el 89% de la superficie regional. La cuenca comprende provincias de la región de B. O'Higgins, tales como Cachapoal, Colchagua y Cardenal Caro, además de las provincias de Melipilla y Curicó, que corresponden a las regiones Metropolitana y del Maule, respectivamente.

La superficie total que abarca el uso urbano es de 9.406 Ha, la cuales corresponden al 1% de la superficie total de la cuenca. Este tipo de uso comprende a ciudades, pueblos y zonas industriales.

La población total de las comunas de la cuenca alcanza los 894.923 habitantes emplazadas en su mayoría en el sector oriente (INE 2007). En esta zona, las ciudades con mayor número de población urbana corresponden a Rancagua, San Fernando, Rengo, Machalí y Graneros, que alcanza un total de 460.514 habitantes (Flores et al. 2010).

En cuanto a su distribución espacial, estas localidades se encuentran próximas a los principales ríos tributarios que posee la cuenca: Cachapoal, Tinguiririca y Claro de Rengo.

La Tabla 2 indica los asentamientos o comunas que pertenecen a la Cuenca de Rapel, junto con señalar la superficie que ocupan de la cuenca, la población total comunal y el principal cause asociado a la localidad.

Tabla 2 Asentamientos pertenecientes a la cuenca de Rapel.

Asentamiento	Significado de nombre	Área Km ²	Población comunal	Cause asociado a la localidad
Codegua	Lugar de aguas de ratas	285	12.988	Estero Leona
Coinco	Agua del arenal	99	7.359	Río Cachapoal
Coltauco	Agua de Renacuajo	222	19.597	Río Cachapoal
Las Cabras	-	753	24.640	Río Cachapoal
Machalí	Pueblo de Machis	2594	52.505	Río Cachapoal
Malloa	Greda Blanca	220	13.407	Quebrada el Peumo
Peumo	-	154	14.313	Río Cachapoal
Pichidegua	Pequeños Degus	321	19.714	Río Tinguiririca
Quinta de Tilcoco	Agua de Chilco	86	13.002	Río Cachapoal
Rancagua	Lugar de Rancas	261	241.774	Río Cachapoal
Rengo	Invencible	585	58.825	Río Claro
Requinoa	Solo cabellos de Ángel	676	27.968	Estero Tipaume
San Vicente de Tagua Tagua	-	484	46.766	Estero Zamorano
La Estrella	-	429	3.041	Estero Seco
Litueche	Gente de la Tierra Blanca	613	6.294	Estero Seco
Marchihue	Lugar de Machis	659	7.308	Estero la Rosa
Navidad	-	302	6.641	Río Rapel
Chépica	Hierba grama	482	15.037	Estero Guirvilo
Chimbarongo	Niebla del otro lado	508	35.399	Río Tinguiririca
Nancagua	Lugar de muchos aguiluchos	151	17.833	Río Tinguiririca
Palmilla	-	234	12.482	Río Tinguiririca
Peralillo	-	282	11.007	Estero Peralillo
Placilla	-	145	8.738	Río Tinguiririca
Pumanque	Cóndores	441	3.421	Estero Elcolhue
-San Fernando	-	441	3.421	Río Tinguiririca
Santa Cruz	-	392	73.973	Río Tinguiririca
Olivar	-	44	13.608	Río Cachapoal
Graneros	-	113	33.437	Estero Las Cadenas
San Pedro	-	794	9.726	Río Rape
Teno	-	621	28.921	Estero Limanque
Alhué	Alma de muerto	535	6.444	Estero Alhué
Santo Domingo	-	1.342	10.900	Río Rapel

1.9.4 Actividades económicas

Con respecto a las actividades económicas, estas en su mayoría son del tipo silvoagropecuaria y minera. Con respecto a la primera, la actividad agrícola destaca debido a la importante superficie que ha destinado al cultivo de cereales, legumbres y cultivos industriales. Dentro de los principales cultivos, el maíz es el que alcanza la mayor superficie cultivada de 55900 ha, representando el 34% de toda la superficie cultivada (INE 2007). La Tabla 1 señala en detalle los principales cultivos y sus respectivas superficies cultivadas (INE 2007).

Tabla 3 Superficie cultivada (ha) de los principales cultivos de la cuenca de Rapel (INE 2007)

Cultivo	Superficie (ha)	Cultivo	Superficie (ha)	Cultivo	Superficie (ha)
Maíz	55920	Ciruelo Japonés	2818	Zapallo	1757
Viñas tintos	28036	Duraznero fresco	2815	Almendro	1679
Uva de mesa	13714	Cerezo	2596	Cebolla de guarda	1649
Alfalfa	7131	Nectarino	2585	Melón	1596
Manzano rojo	6079	Tomate industrial	2567	Choclo	1588
Duraznero conservero	3984	Palto	2381	Trigo blanco	1493
Ciruelo Europeo	3637	Mezcla forrajera	2288	Nogal	1477
Manzano verde	3260	Kiwi	1946	Sandía	1310
Peral Europeo	3210	Trigo candeal	1928	Tabaco	1236
Naranja	3050	Papa	1767	-	-

Dentro de la cuenca, las provincias que poseen mayor superficie de terrenos agrícolas son, Cachapoal (161.500 Ha) y Colchagua (117.900 Ha), concentrando el 54% y 39% de la superficie cultivable de la cuenca respectivamente. La superficie destinada al uso agrícola en la provincia de Cardenal Caro y Melipilla es de 9.550 (3%) y 3.800 Ha (1,3%).

La superficie de suelo destinada al uso forestal, constituida principalmente por plantaciones de Pino radiata y Eucaliptus es reducida, la cual alcanza los 15.693 ha y corresponde al 1% de la superficie total de la cuenca.

Las provincias que poseen mayor superficie de uso forestal son Cardenal Caro (9.325 Ha) y Cachapoal (3.759 Ha), concentrando el 59% y 24% de la superficie forestal respectivamente, por otra parte, la superficie destinada a este uso en la provincia de Colchagua y Melipilla es de 2.542 (16%) y 67 Ha (0,4%) respectivamente. Cabe señalar que la superficie de bosque Nativo alcanza las 125.377 Ha y de Bosque Mixto 1.342 Ha (DGA 2004).

Con respecto al sector minero metálico, el más importante está representado por la minería del cobre de El Teniente. La superficie usada para esta actividad corresponde a 3.399 Ha, lo cual equivalen al 0,3% de la superficie total de la cuenca, y se ubica en el sector nororiente de la cuenca.

1.9.5 Áreas bajo Protección Oficial y Conservación de la Biodiversidad.

Las Áreas bajo Protección Oficial pertenecientes al Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas por el Estado (SNASPE), corresponden al Parque Nacional Las Palmas de Cocalán y Reserva Nacional río Los Cipreses.; la superficie total abarcada por estas áreas es de 6.474 Ha aproximadamente, equivalentes al 1% de la superficie total de la cuenca (DGA 2004).

Los sitios de conservación de la biodiversidad existentes en la cuenca corresponden a Las Cardillas y Alto Huemul. Las principales características ecosistémicas de Las cardillas, radican en la presencia de bosque esclerófilo y comunidades de Ciprés de cordillera Andina, especie que se encuentra en estado de casi amenazada y Vulnerable (VU) (MMA 2019). Por otro parte, el sitio de conservación Alto Huemul, presenta alta diversidad de especies

vegetales y animales con problemas de conservación tales como Ciprés de cordillera Andina, Carpintero negro que se encuentra en Peligro o vulnerable , además del Zorro Chilla el cual presenta un estado de conservación de preocupación menor .

1.10 Objetivos

1.10.1 Objetivo General

Aportar un protocolo para el cálculo de la erosión potencial a partir del uso de las herramientas disponibles de Sistemas de Información Geográfica (SIG) e información de fácil acceso, junto a la identificación de la situación general de pérdida de suelo que afecta a la agricultura desarrollada en la cuenca de Rapel

1.10.2 Objetivos específicos

Identificar el tipo de influencia que juegan cada uno de los factores modelados de la Ecuación de Pérdida de Suelo (USLE), para la posterior identificación de su afectación en la cuenca de Rapel.

Comprender el deterioro del recurso suelo, en razón de pérdida de suelo $\left(\frac{Mg}{año}\right)$ y en pérdida de superficie cultivable $\left(\frac{ha}{año}\right)$, con uso y no uso de prácticas de conservación en la cuenca y en las comunas de la cuenca de Rapel.

Colegir la eficacia del presente protocolo, para el seguimiento de los procesos de desertificación en la cuenca de Rapel.

II. FACTOR R. EROSIVIDAD DE LA PRECIPITACION

El factor R es el índice de erosión pluvial y recoge la influencia que sobre la erosión tiene la energía cinética de la lluvia, disgregando las partículas del suelo y compactado su superficie. Es la variable que contabiliza el efecto combinado de la duración, magnitud e intensidad de la precipitación por evento, además de determinar la aparición de la escorrentía superficial cuando se supera la capacidad máxima de infiltración del suelo (ICONA 1991).

En la Revised Universal Soil Loss Equation model (RUSLE), la cual corresponde a una versión revisada de USLE (Renard y Freimund 1994), se señala una aproximación para calcular el factor R con un requerimiento menor de detalle en la información a lo descrito en el manual de USLE.

En la ecuación RUSLE se establece una relación entre los R calculados a partir del método USLE (Wischmeier, Smith, y Otros 1978) y los registros de precipitación disponibles, la cual es extrapolada y los R son estimados por estación con los datos de precipitación asociados, a continuación son trazadas isolíneas entre estación, para finalmente estimar por interpolación los valores de sitios entre isolíneas

2.1 Método de Cálculo.

El cálculo del factor R descrito por el manual de USLE, esta descrito como el promedio anual de los registros de precipitaciones continuos mayores a 20 años; si los años de monitoreo de precipitaciones para una estación en particular son menores a lo descrito por USLE, el R calculado perderá precisión y no será representativo de la energía erosiva de precipitación que afecta a esa zona.

El registro de precipitaciones por año corresponde a la suma de los índices de erosividad (EI) de las lluvias individuales de un año (Renard y Freimund 1994). Esta relación se muestra en la Ecuación 2.

$$R = \frac{1}{n} \cdot \sum_{j=1}^n (EI)_n \quad \text{Ecuación 2}$$

Para calcular el valor del índice de erosión (EI) para una tormenta en particular, se debe multiplicar la energía cinética total de la tormenta (E) por la cantidad máxima de lluvia que cae dentro de 30 minutos consecutivos $[(I)_{30}]$.

$$EI = E \cdot I_{30} \quad \text{Ecuación 3}$$

La energía cinética total por evento es calculada por la Ecuación 4.

$$E = \sum_{r=1}^m e_r \Delta V_r \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde e_r es la energía de la lluvia por mm caídos de precipitación, y puede ser calculada por la relación presentada en la Ecuación 5, y ΔV_r corresponde a los mm caídos de lluvia en el intervalo de tiempo en que la intensidad de la precipitación es constante.

$$e_r = 0,29 \cdot (1 - 0,72 \cdot \exp^{-0,05 \cdot i_\tau}) \quad \text{Ecuación 5}$$

La expresión (i_τ) , corresponde a la intensidad de lluvia, y es definida para un evento particular de lluvia por la Ecuación 6, siendo Δt_τ el delta de tiempo estudiado para ese evento.

$$i_\tau = \frac{\Delta V_r}{\Delta t_\tau} \quad \text{Ecuación 6}$$

Finalmente, la Ecuación 7 señala la relación de cálculo del factor R descrito por el manual de USLE. Esta relación está en función de los parámetros de Energía cinética total de la tormenta (E) y la cantidad máxima de lluvia que cae dentro de 30 minutos consecutivos (I)₃₀.

$$R = \frac{1}{n} \cdot \sum_{j=1}^n \left(\sum_{k=1}^m (E)_k \cdot I_{30k} \right) \quad \text{Ecuación 7}$$

El método señalado en RUSLE para la determinación de R por interpolación, fue aplicado variadas localidades de Chile central (Bonilla y Vidal 2011), estableciendo una regresión entre los totales de precipitación anual por estación de monitoreo (correspondiente a 274 puntos) y los R propios de cada estación. A partir de este método, se obtuvo la Ecuación 8, donde R corresponde al factor de erosividad de precipitación lluvia $\left(\frac{MJ \cdot mm}{ha \cdot hora \cdot año}\right)$, P al promedio anual de precipitación (mm), y 0,028 como 1,534 son ajustes paramétricos específicos para la región.

$$R = 0,028 \cdot P^{1,534} \quad \text{Ecuación 8}$$

Figura 5 corresponde a la gráfica del ajuste señalado por la Ecuación 8, y señala un rango de aplicación entre 18 – 3402 $\left(\frac{mm}{año}\right)$ de precipitación para el cálculo del factor R.

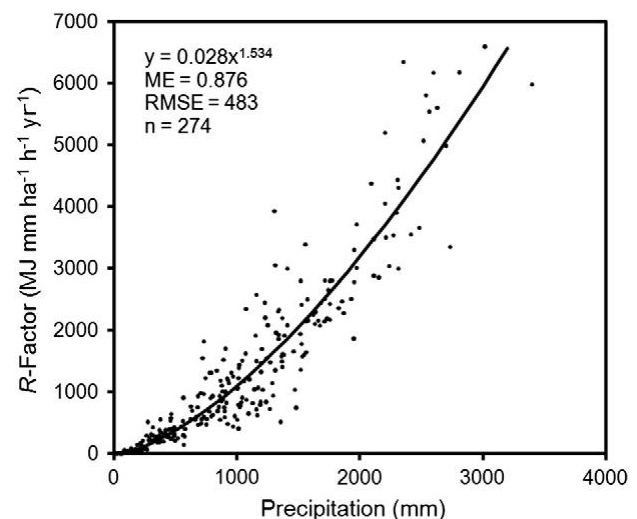


Figura 5 Relación entre valor R calculado y el promedio anual de precipitaciones (Bonilla y Vidal 2011).

La Ecuación 8 fue aplicada en la imagen raster (Anexo B.1.2 Modelo Raster) presentada en la Figura 6, la cual corresponde al promedio de precipitaciones anuales de la cuenca de Rapel. (Santibañez y Col. 2017), para esto se hizo uso de la herramienta *Raster Calculator* del software ArcGIS.

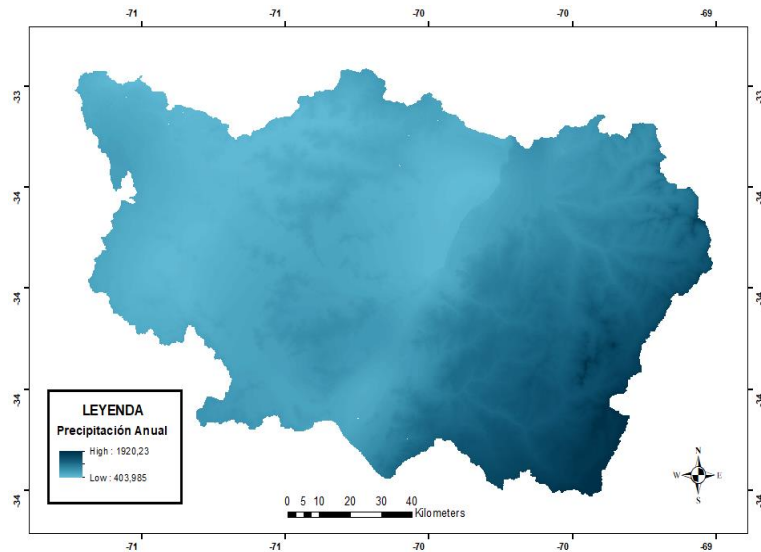


Figura 6 Precipitaciones promedio anuales de la cuenca de Rapel (Santibañez y Col. 2017)

2.2 Limitación del área de estudio en la cuenca de Rapel

La totalidad del área correspondiente a la cuenca de Rapel considera geografía montañosa de suelo no consolidado, por lo cual para alcanzar el propósito del presente trabajo, es idóneo acotar el área de la cuenca a solo las zonas que presenten suelo apto para la agricultura.

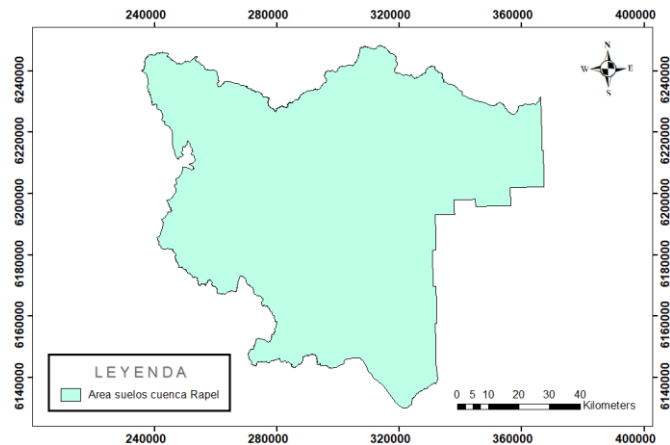


Figura 7 Delimitación del área de estudio de la cuenca de Rapel

La Figura 7 muestra los límites en los que serán calculados los distintos factores de la USLE.

2.3 Análisis de la erosividad de la precipitación

Los fundamentos de la hidrología superficial señalan a los fenómenos de retención, infiltración, percolación y escurrimiento, como el destino del flujo hídrico luego de caer la lluvia sobre la superficie del suelo (Santibáñez 1994).

La erosión hídrica es el resultado de la alteración del suelo por el agua, siendo el inicio del proceso el impacto de las gotas de lluvia al dispersar los agregados del suelo. Tal fenómeno es conocido como erosión por salpicamiento (Anexo. A.3. Tipos de erosión hídrica), y es directamente proporcional a la energía cinética de lluvia.

La energía cinética de un aguacero está en función del tamaño de las gotas de lluvia, y la velocidad terminal de las mismas al impactar en el suelo; ambos conceptos se relacionan con la intensidad de lluvia. Como fue mencionado previamente, la intensidad de lluvia corresponde a aquellas pendientes en un intervalo de tiempo, que relacionan los mm caídos de lluvia con un tiempo definido, dentro del total del tiempo que abarca el episodio de precipitación.

Cabe señalar que para el cálculo de la energía cinética de lluvia por episodio (Ecuación 5), es necesario identificar aquellos intervalos de tiempo de precipitación en los cuales ocurren bruscos cambios de los *mm* caídos, y con ello definir las distintas intensidades de precipitación que se presentan por evento de lluvia. Previo a este cálculo, es necesario identificar la magnitud de la energía de lluvia por unidad de mm caídos (Ecuación 5) siendo esta última relación, proporcional de modo exponencial a las pendientes o intensidades de precipitación por episodio.

En base a la Ecuación 5 es posible comprender que la erosionabilidad de las lluvias, depende fuertemente de la intensidad en que la precipitación se presenta, incluso más que los mm caídos. Este fenómeno se destaca al analizar el índice de erosión (EI) (Ecuación 3), el cual se define como el producto entre la energía cinética por episodio de lluvia y la máxima cantidad de lluvia caída por 30 minutos consecutivos.

2.3.1 Análisis erosividad de la precipitación a escala de cuenca

La Figura 8 da cuenta del mapa de variación del factor de erosividad de la precipitación (R) en la cuenca de Rapel. Este mapa fue modelado a partir de la Ecuación 8, la cual relaciona los R calculados por estación y sus respectivos promedios anuales de precipitación, por medio de un ajuste potencial.

El intervalo de erosividad de precipitación a escala cuenca fluctúa entre los 279 y $1618 \left(\frac{MJ \cdot mm}{ha \cdot hora \cdot año} \right)$, encontrando los valores mas bajos en los valles interiores (zonas celestes) y los mas altos a mayores latitudes y altitudes (zonas azules).

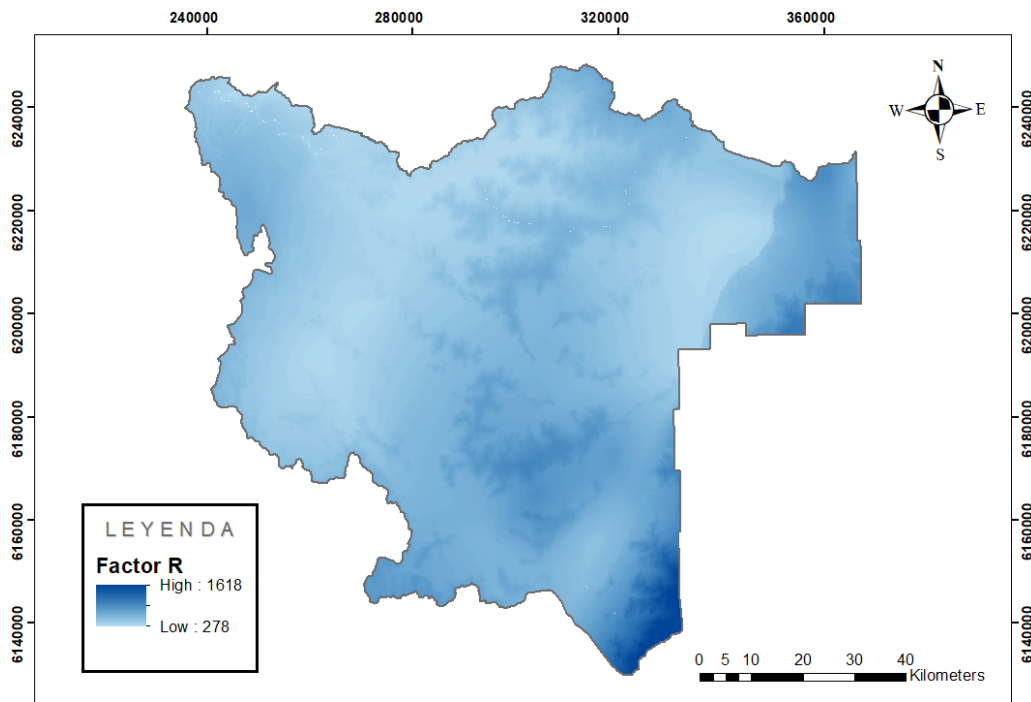


Figura 8 Mapa Factor R. Erosividad de la precipitación a escala cuenca.

Al estudiar el histograma de valor R calculados para cuenca de Rapel (Figura 9), encontramos que el conjunto de datos presenta un sesgo hacia la derecha y valores atípicos sobre los 800 $\left(\frac{MJ \cdot mm}{ha \cdot hora \cdot año}\right)$. Esto da cuenta de la baja variación de erosionabilidad existente en la cuenca, lo cual es debido a similares intensidades y mm caídos en la mayor parte del área.

Cabe señalar que a consecuencia de la exclusión de zonas montañosas en el estudio, los registros más altos de precipitación también fueron descartados, aun así en la Figura 8 se puede observar una clara tendencia de aumento de erosividad de precipitación en aquellas zonas de mayor altura.

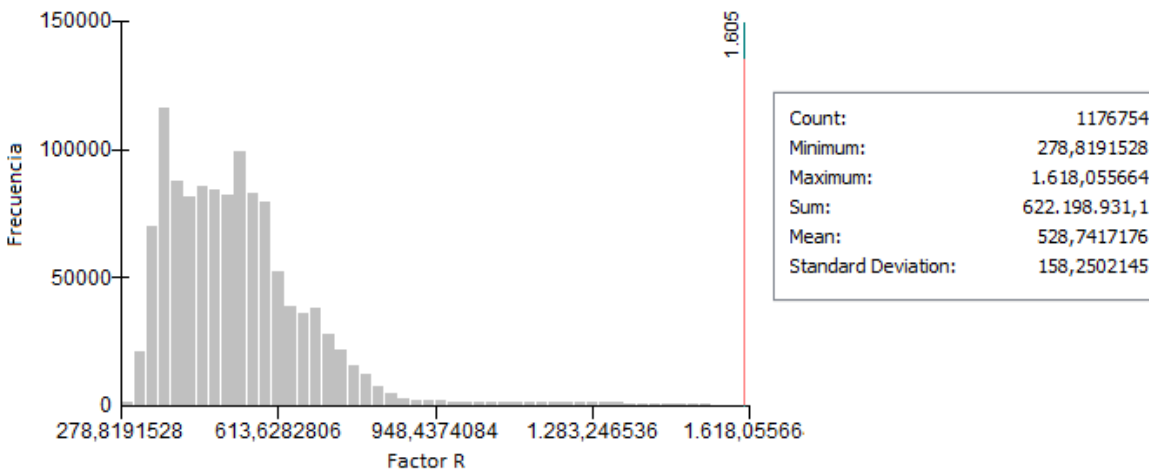


Figura 9 Histograma de valor R en cuenca de Rapel.

2.3.2. Análisis erosividad de la precipitación a nivel comunal

La Figura 10 muestra una clara tendencia de menor erosividad de precipitación en aquellas comunas ubicadas al noroeste, y una mayor en aquellas ubicadas hacia el sureste; fenómeno correlacionado con la altitud y latitud de las zonas.

Las comunas extremas para el factor de erosividad de la precipitación corresponden a Olivar y Placilla, con 355 y 746 $\left(\frac{MJ \cdot mm}{ha \cdot hora \cdot año}\right)$ respectivamente; remarcando la uniformidad de la zona para el factor R.

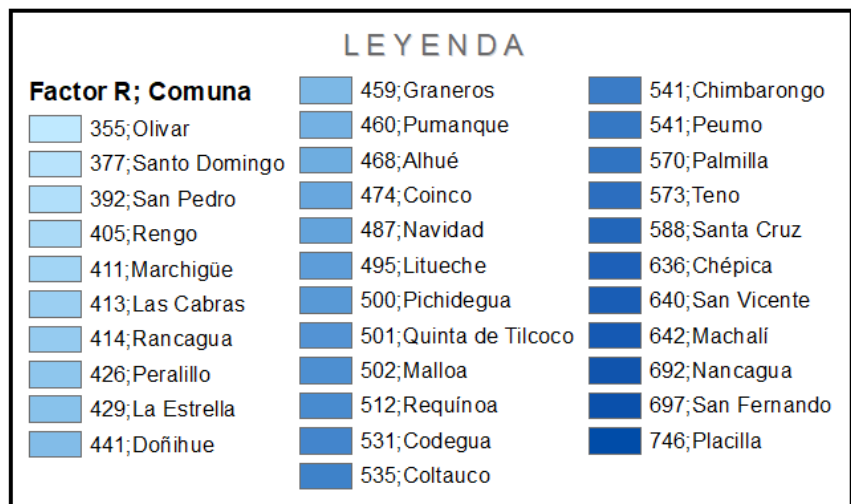
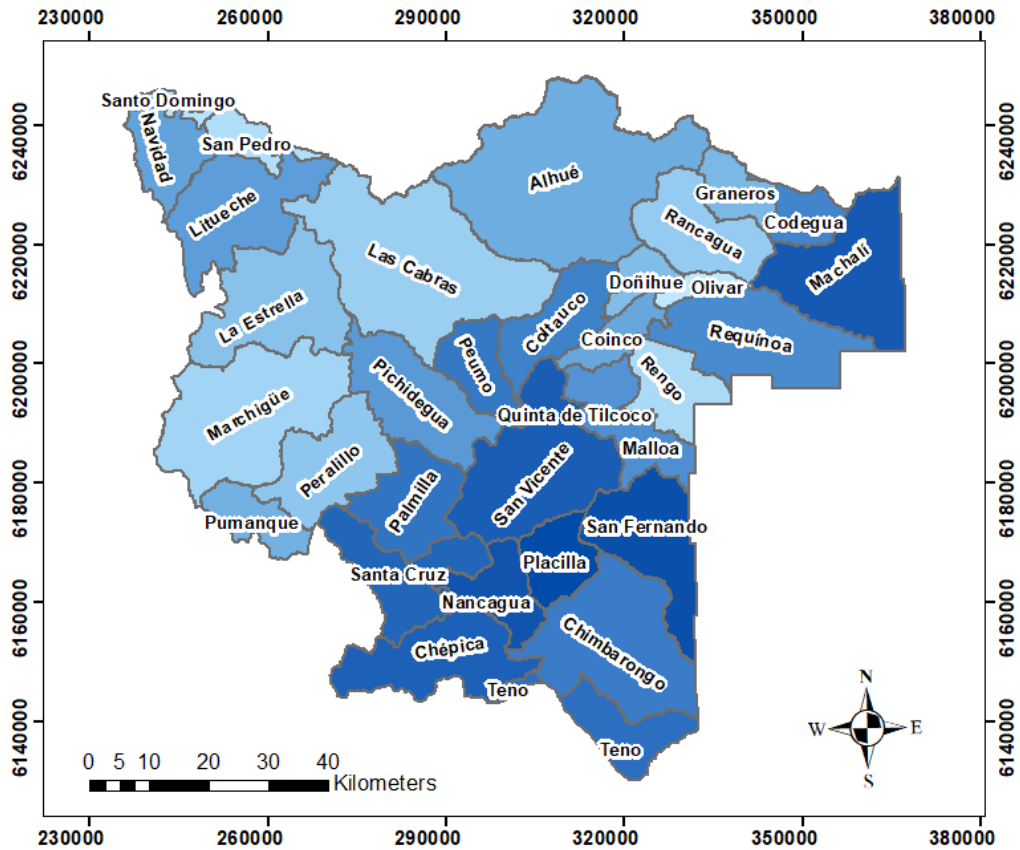


Figura 10 Mapa Factor R. Erosividad de la precipitación a nivel comunal.

III. FACTOR K. ERODABILIDAD DEL SUELO

El factor de erodabilidad del suelo, es la tasa de pérdida de suelo (Mg) por unidad de índice de erosión $\cdot \left(\frac{MJ \cdot mm}{ha \cdot hora \cdot año} \right)^{-1}$ para un suelo específico. Este factor es medido en una unidad de parcela (ha), siendo esta definida como una longitud uniforme de 22,1m en una pendiente constante de 9% en barbecho de labranza limpia (Wischmeier, Smith, y Col. 1978).

Producto del impacto de las gotas de lluvia, ocurre la desagregación de la estructura del suelo, lo cual genera un sello superficial que disminuye la capacidad de infiltración del suelo. Este fenómeno conlleva un aumento de escorrentía superficial, la cual se traduce en un favorecimiento de la aparición de erosión laminar.

La aparición de la erosión hídrica esta en relación directa con la energía cinética de la lluvia, pero a la vez, también lo está con la erodabilidad o vulnerabilidad a la erosión del suelo. Por su parte, la erodabilidad del suelo está en función de la textura, estructura, materia orgánica y permeabilidad del mismo. Estos factores influyen de modo distinto en la vulnerabilidad del suelo a la erosión, ya sea oponiendo resistencia a la erosión, o bien favoreciendo a la misma. (ANEXO A.1. Composición del Suelo)

3.1 Ordenes de suelos en la cuenca de Rapel

3.1.1 Alfisoles

El Orden de los Alfisoles se caracteriza por presentar un horizonte subsuperficial (Endopediones) de acumulación de arcillas (horizonte Argílico), además de presentar un horizonte superior pobre en materia orgánica.

Los procesos pedogenicos más significativos de un Alfisol son la formación de los horizontes superficiales

(Epipediones) y los procesos de eluviación de arcillas, ambos producto a la alternancia entre periodo lluvioso y cálido (régimen xéricos) que caracterizan a estos suelos. Cabe señalar que la eluviación de arcillas dan lugar a los horizontes álbicos y argílicos, además de procesos de descalcificación y calcificación (Ibañez A. y Col. 2011a).

La Figura 11 muestra la disposición del orden Alfisol en la cuenca de Rapel.

3.1.2 Molisoles

Los molisoles son suelos caracterizados por la existencia de un epipedón móllico, el cual es un horizonte superficial rico en materia orgánica bien humificada, saturado en cationes bivalentes (generalmente Ca), estructurado y espeso.

Estos suelos se dan en una gran variedad de zonas climáticas y suelen encontrarse en altas latitudes. La vegetación típica de los Molisoles es la pradera y jamás de permafrost.

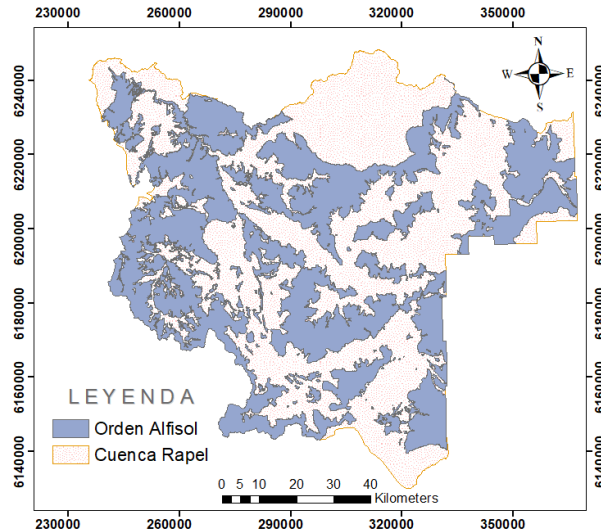


Figura 11 Orden Alfisol en cuenca de Rapel.

La génesis de los Molisoles está muy relacionada con los procesos que tienen lugar durante la formación del epipedión molico. Este horizonte se forma por adición de materia orgánica procedente de las praderas y la vegetación herbácea, la cual se acumula en grandes cantidades y cuya descomposición da lugar a compuestos oscuros relativamente estables, producto de la presencia de cationes divalentes, particularmente de Ca (Ibañez A. y Col 2011d).

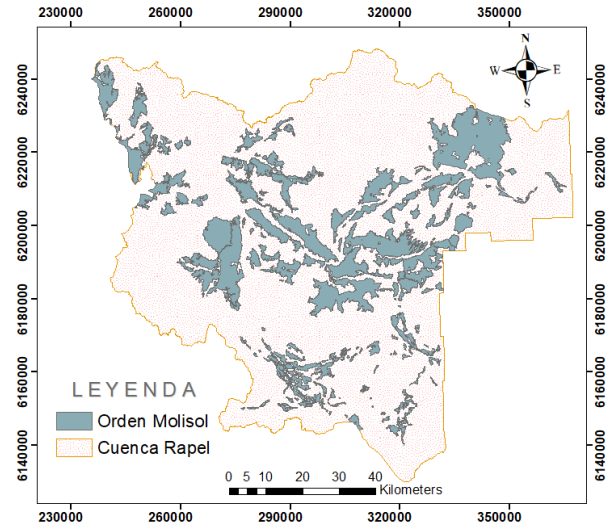


Figura 12 Orden Molisol en cuenca de Rapel

La Figura 12 muestra la disposición del orden Molisol en la cuenca de Rapel.

3.1.3 Inceptisoles

Son suelos bastante jóvenes que comienzan a desarrollar horizontes, se forman en zonas con pendientes abruptas, donde la erosión del suelo continuamente elimina la parte superficial del terreno, y en climas que inhiben el desarrollo del suelo, ya sea por bajas temperaturas como por escasas precipitaciones (Ibañez A. y Col 2011c).

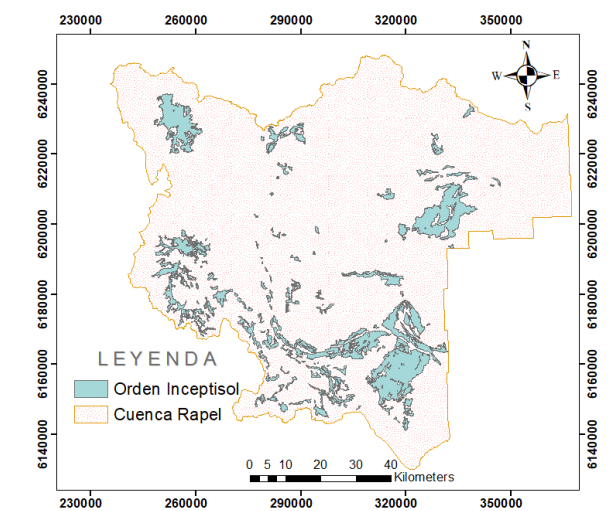


Figura 13 Orden Inceptisol en cuenca de Rapel

El material parental del que están formados, corresponde a materiales volcánicos vítreos, los cuales son altamente calcáreo y resistente a la meteorización.

La Figura 13 muestra la disposición del orden Inceptisol en la cuenca de Rapel.

3.1.4 Vertisoles

El nombre Vertisol deriva del latín y significa verter o revolver, haciendo alusión al efecto de batido y mezcla provocado por la presencia de arcillas hinchables, siendo suelos arcillosos propiamente dichos.

Son suelos que se desarrollan en climas tropicales y subtropicales con una marcada diferencia entre estaciones seca y húmeda. Estas condiciones ambientales

favorecen la formación de arcillas que tienen la propiedad de hincharse cuando están húmedas y encogerse al secarse (Ibañez A. y Col 2011e).

La Figura 14 muestra la disposición del orden Vertisol en la cuenca de Rapel.

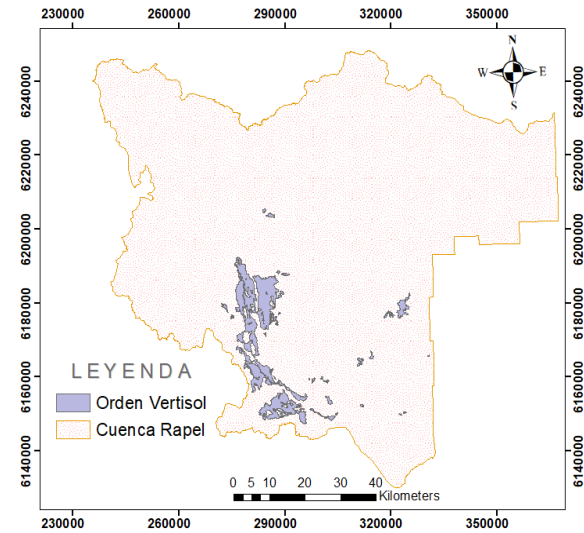


Figura 14 Orden Vertisol en cuenca de Rapel

3.1.5 Entisoles

Los Entisoles son los suelos más jóvenes, ya que no tienen evidencias de desarrollo de horizontes pedogenicos, y son formados sobre material parental no consolidado. Sus propiedades están fuertemente determinadas por el material parental junto con presentar texturas gruesas y alta permeabilidad. Son suelos

típicos de laderas donde la escorrentía no permite la evolución de los suelos en profundidad a causa de la erosión hídrica (Ibañez A. Col 2011b). La Figura 15 muestra la disposición del orden Entisol en la cuenca de Rapel.

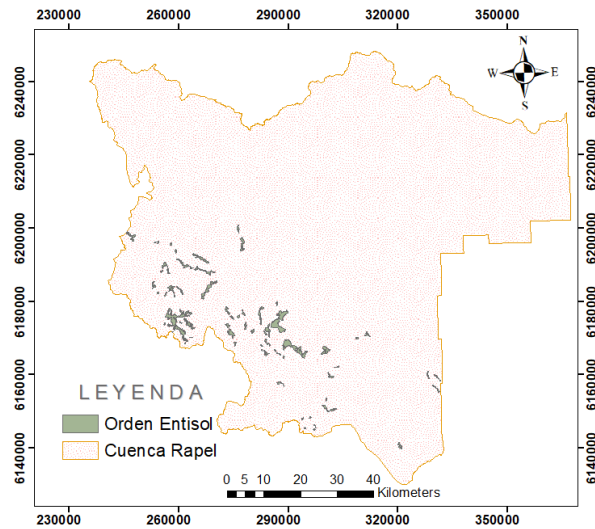


Figura 15 Orden Entisol en cuenca de Rapel

3.2 Método de Calculo

La erodabilidad o vulnerabilidad del suelo a la erosión, es una característica propia del suelo ligada a su granulometría, porosidad y condiciones hidrológicas (ICONA 1991). La USLE identifica la erodabilidad del suelo como el Factor K, el cual representa la tasa de erosión del suelo $\left(\frac{Mg}{ha}\right)$ por unidad de índice de erosión pluvial $\left(\frac{MJ \cdot mm}{ha \cdot h \cdot año}\right)$, y lo cuantifica en unidades

$$\text{de } \left(\frac{Mg}{ha}\right) \cdot \left(\frac{MJ \cdot mm}{ha \cdot h \cdot año}\right)^{-1}.$$

En el manual de la USLE (Wischmeier, Smith, y Col. 1978), se incluye un gráfico (Figura 16) para estimar el valor de K en función de la textura, contenido de materia orgánica, estructura y permeabilidad del suelo, donde se considera que son estos factores, y en el orden señalado, los que determinan la erodabilidad de cada suelo.

Para suelos que contienen menos del 70 % de limo y arena fina, el nomograma señalado en el manual mencionado y que se muestra en la Figura 16 resuelve la siguiente ecuación:

Ecuación 9

$$K = (2,1 \cdot M^{1,14} \cdot (12 - a) + 3,25 \cdot (b - 2) + 2,5 \cdot (c - 3)) \cdot 1,317 \cdot 10^{-3}$$

Donde K corresponde al factor de erodabilidad del suelo, M el valor textural calculado de acuerdo a la Ecuación 10, a el porcentaje de materia orgánica, b el código de tipo de estructura obtenido y c el código de tipo de permeabilidad obtenidos de la Tabla 4.

$$M = (\%Limo + \%Arena) \cdot (100 - \%Arcilla) \quad \text{Ecuación 10}$$

La ecuación es aplicada con los datos presentados en la Tabla 5 perteneciente al Shapefile B.1.1 Modelo vectorial) de series de suelos (Figura 17) de la región de O'Higgins (CIREN 1996)

Tabla 4 Código para tipo de estructura y permeabilidad

Tipo Estructura	Código	Tipo Permeabilidad	Código
Granular muy fina	1	Rápida	1
Granular fino	2	Moderadamente rápida	2
Granular grueso a medio	3	Moderada	3
Blocosa/ Laminar/ Masiva	4	Moderada a lenta	4
-	-	Lenta	5
-	-	Muy lenta	6

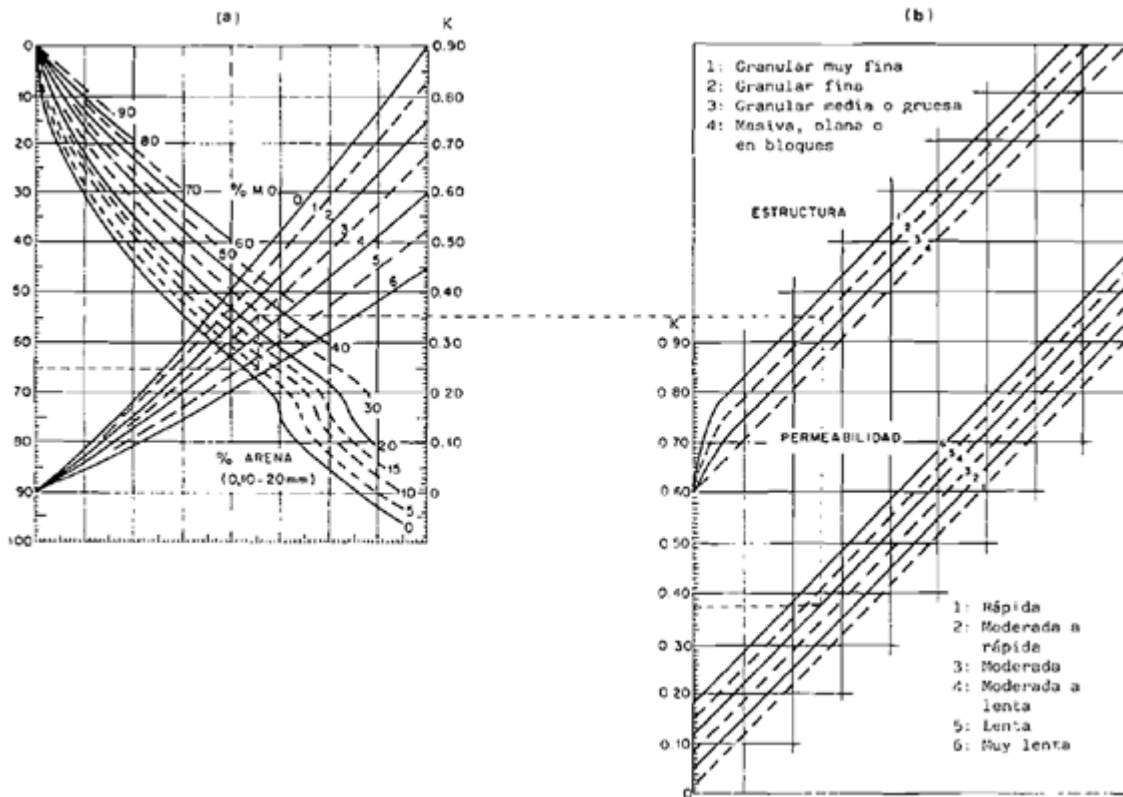
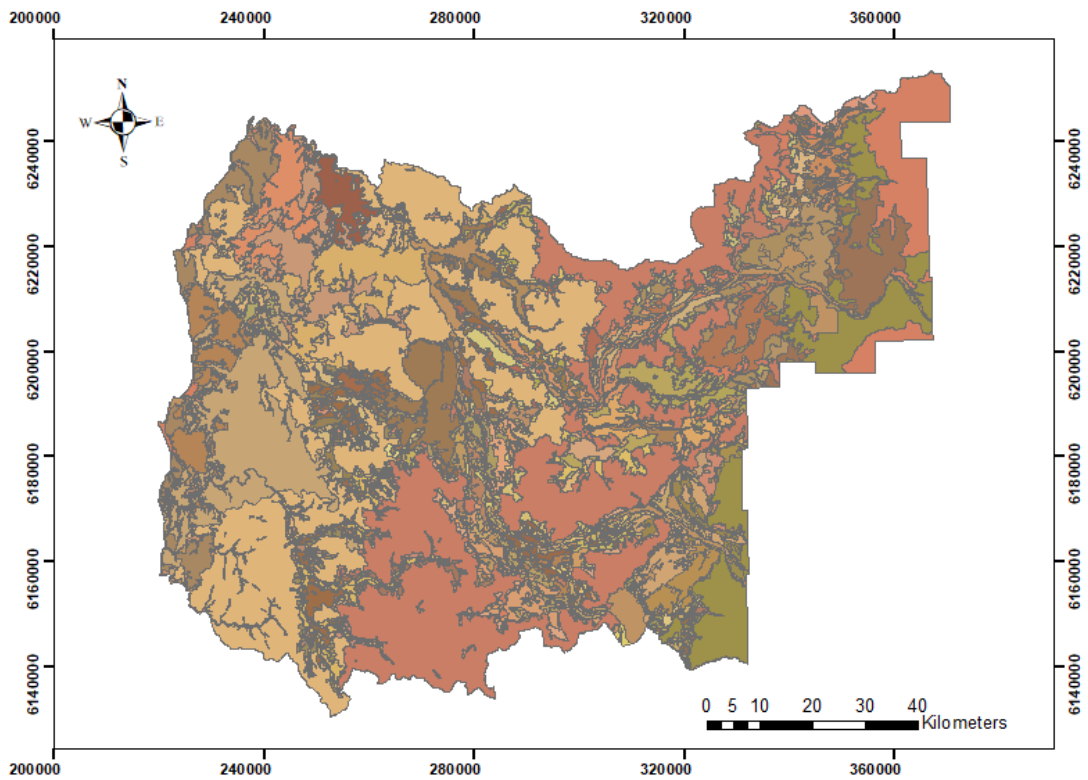


Figura 16 Nomograma que resuelve la ecuación K (Wischmeier, Smith, y Col. 1978)



LEYENDA

Serie de suelo R. O'higgins

SERIE			
■ AJIAL	■ CARRIZAL	■ LOS LINGUES	■ PUENTE NEGRO
■ ALANTANNA	■ CASAS DE CAREN	■ MACARENA	■ PUMANQUE
■ ALMAHUE	■ CHEPICA	■ MAITEN DE MALLOA	■ PUPILLA
■ ANTIVERO	■ CHINCOLANTE	■ MALAMBO	■ PUQUILLAY
■ ASOCIACION ALTO COLORADO	■ CHIPANA	■ MALLOA	■ QUELMENES
■ ASOCIACION CHALLAY	■ COCALAN	■ MANGUMAN	■ QUIAHUE
■ ASOCIACION COGUIL	■ COLCHAGUA	■ MARCHANT	■ QUILAMUTA
■ ASOCIACION CURANIPE	■ CORCOLEN	■ MARCHIHUE	■ QUINAHUE
■ ASOCIACION CUZCO	■ CUNACO	■ MILLAHUE	■ QUINCHAMALAL
■ ASOCIACION ESPINILLO	■ ESTANCILLA	■ MIRAVALLE	■ RANCAGUA
■ ASOCIACION LA LAJUELA	■ GATERA	■ MISCELANEOS	■ RANQUILHUE
■ ASOCIACION MACAL	■ GOYANA	■ NILAHUE	■ SAN PEDRO DE ALCANTARA
■ ASOCIACION MANSEL	■ GRANEROS	■ NO SUELOS	■ SAN VICENTE
■ ASOCIACION MATANZAS	■ GRANEROS DE LA CABANNA	■ OHIGGINS	■ TALCAREHUE
■ ASOCIACION PIUCHEN	■ GUALAS	■ OLIVAR	■ TALHUEN
■ ASOCIACION ROSARIO	■ HACIENDA ALHUE	■ PALQUIALES	■ TENO
■ ASOCIACION SIERRA BELLAVISTA	■ HUIQUE	■ PATAGUAS	■ TERRAZA ALUVIAL ANTIVERO-ZAMOR
■ AYTUE	■ LA BURRA	■ PEOR ES NADA	■ TERRAZA ALUVIAL RIO CACHAPOAL
■ BAJIOS	■ LA ROSA	■ PEUMO	■ TERRAZA ALUVIAL RIO CLARO
■ BARAHONA	■ LAGUNA DE SAN VICENTE DE TTT	■ PEUMO CHICO	■ TERRAZA ALUVIAL VALLES COSTERO
■ CACHAPOAL	■ LARMAHUE	■ PEUMO LO CHACON	■ TINGUIRIRICA
■ CALEUCHE	■ LAS GARZAS	■ PICHIDEGUA	■ TOCO
■ CALLEJONES	■ LIHUEIMO	■ PIDIHUINCO	■ TRICAHUE
■ CANNETENES	■ LIMANQUE	■ PILPOY	■ VINNA VIEJA
	■ LO VASQUEZ	■ PIMPINELA	■ YAQUIL
	■ LOMA GRANDE	■ POLONIA	■ ZAMORANO
	■ LOS CARDOS	■ PUDAHUEL	

Figura 17 Series de suelo correspondiente a la Región libertador B. O'Higgins. (CIREN 1996)

Tabla 5 Series de suelo para la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins (CIREN 1996)

SERIE	M	% MO	b	c	SERIE	M	% MO	b	c	SERIE	M	% MO	b	c
AJIAL	8100	4.2	2	3	ASOCIACION LA LAJUELA	6400	2.6	2	2	PIMPINELA	7225	1.4	2	2
ALMAHUE	900	5.4	3	4	LOS CARDOS	900	1.9	3	4	PUENTE NEGRO	6400	2.2	2	4
ASOCIACION ALTO COLORADO	8100	3.0	2	2	LOMA GRANDE	6400	2.0	4	3	POLONIA	900	5.9	2	4
ANTIVERO	6400	2.3	2	2	GATERA	4225	10.0	2	5	PUPILLA	2025	2.5	3	4
ALANTANNA	2025	3.8	2	5	LOS LINGUES	6400	3.7	3	4	PEOR ES NADA	7225	1.8	4	4
AYTUE	2025	4.3	2	3	LIHUEIMO	3025	4.4	3	4	PATAGUAS	2025	3.8	2	2
BARAHONA	6400	2.0	2	3	LIMANQUE	6400	8.3	3	2	PUDAHUEL	8100	2.1	1	2
BAJIOS	7225	2.7	2	3	LARMAHUE	8100	2.4	2	2	PUMANQUE	8100	0.8	4	3
LA BURRA	2025	3.4	4	3	LA ROSA	6400	3.4	2	2	PUQUILLAY	6400	2.6	3	4
CARRIZAL	8100	2.5	2	3	LAGUNA DE SAN VICENTE DE TT	2025	6.1	1	3	QUINCHAMALAL	8100	1.2	2	3
CANNETENES	6400	5.1	4	3	LO VASQUEZ	8100	1.9	1	2	QUIAHUE	900	5.5	2	4
COCALAN	8100	2.6	2	4	MARCHIHUE	8100	0.6	2	4	QUILAMUTA	8100	0.9	1	2
CACHAPOAL	6400	2.4	2	2	MANCUMAN	8100	1.6	4	1	QUELMENES	5578	3.0	2	3
CORCOLEN	6400	3.2	2	2	MACARENA	6400	2.4	2	2	QUINAHUE	6400	3.0	2	3
CASAS DE CAREN	6400	3.2	1	2	ASOCIACION MACAL	6400	3.0	2	2	RANQUILHUE	6400	1.8	2	3
ASOCIACION CHALLAY	6400	3.0	2	1	MIRAVALLE	6400	1.8	1	3	RANCAGUA	7225	3.8	1	2
CHIPANA	6400	2.8	2	2	MISCELANEOS	5578	3.0	2	3	ASOCIACION ROSARIO	8100	3.0	2	2
CHINCOLANTE	5578	3.0	2	3	MALAMBO	8100	1.2	2	3	SAN PEDRO DE ALCANTARA	6400	2.0	2	3
CALLEJONES	8100	1.8	2	3	MILLAHUE	6400	2.5	2	3	ASOCIACION SIERRA BELLAVISTA	8100	5.1	2	2
CALEUCHE	7225	1.9	3	4	MALLOA	900	4.4	1	2	ESTANCILLA	9025	2.2	3	2
COLCHAGUA	900	4.9	3	4	ASOCIACION MANSEL	2025	3.0	2	2	SAN VICENTE	4225	5.8	2	3
ASOCIACION COGUIL	8100	3.0	1	4	MARCHANT	8100	1.0	4	3	TALHUEN	8100	1.6	3	4
CHEPICA	4225	3.4	2	2	MAITEN DE MALLOA	8100	3.1	1	2	TERRAZA ALUVIAL RIO CLARO	4225	3.0	2	3
ASOCIACION CURANIPE	4225	3.0	2	2	ASOCIACION MATANZAS	6400	3.0	1	2	TENO	3025	3.0	1	4
CUNACO	8100	3.6	2	3	NILAHUE	6400	2.0	2	3	TERRAZA ALUVIAL RIO CACHAPOAL	8100	3.0	2	2
ASOCIACION CUZCO	8100	3.0	2	2	NO SUELOS	5578	3.0	2	3	TINGUIRIRICA	8100	1.1	3	1
ASOCIACION ESPINILLO	7225	3.0	2	4	OLIVAR	6400	1.8	2	2	TALCAREHUE	6400	2.5	2	2
GRANEROS DE LA CABANNA	4225	4.0	1	3	PICHIDEGUA	8100	2.2	1	1	TOCO	8100	1.6	2	4
GUALAS	900	3.0	2	3	PEUMO CHICO	6400	3.4	4	2	TERRAZA ALUVIAL VALLES COSTERO	8100	3.0	2	2
GRANEROS	6400	3.4	1	3	PIDIHUINCO	6400	4.0	2	2	TRICAHUE	4225	3.4	2	3
LAS GARZAS	7225	2.1	2	3	PILPOY	8100	3.2	2	3	TERRAZA ALUVIAL ANTIVERO-ZAMOR	7225	2.3	2	2
GOYANA	2025	2.3	2	4	ASOCIACION PIUCHEN	6400	2.9	2	2	VINNA VIEJA	8100	3.0	4	2
HACIENDA ALHUE	4225	3.4	2	3	PEUMO LO CHACON	7225	3.0	2	3	YAQUIL	6400	3.3	2	4
OHIGGINS	7225	3.6	1	2	PALQUIALES	2025	3.8	3	4	ZAMORANO	7225	4.3	1	2
HUIQUE	900	2.4	3	4	PEUMO	7225	3.2	1	3	-	-	-	-	-

M= Valor de textura; %MO= porcentaje de materia orgánica; b=código de tipo de estructura; c= código de tipo de permeabilidad

3.3 Análisis de la erodabilidad del suelo

La ecuación de la erodabilidad del suelo (Ecuación 9), señala que este factor está en función de cuatro distintas variables: la estructura, permeabilidad, materia orgánica y textura del suelo; cabe señalar que estas variables influyen de modo distinto en la erodabilidad del suelo, por lo cual pueden jugar un rol de *resistencia* a la erosión hídrica al disminuir la erodabilidad del suelo, o bien un rol de *favorecimiento* a la erosión hídrica cuando aumentan la erodabilidad del suelo.

La estructura, es directamente proporcional a la erodabilidad del suelo, y estructuras tales como Granular grueso, Blocosa, Laminar, Prismoide y Masiva; otorgan una mayor erodabilidad y con ello aumentara la vulnerabilidad del suelo a la erosión hídrica. Esto es descrito por la Tabla 6.

La permeabilidad, es directamente proporcional a la erodabilidad del suelo, y de acuerdo con la facilidad con la que el agua atraviesa al mismo y llega a las napas subterráneas, se puede hablar de un efecto a favor o de resistencia a la erosión del suelo. Suelos con permeabilidad del tipo Lenta o Muy lenta; presentarán mayor vulnerabilidad a la erosión hídrica debido al aumento de la erodabilidad. La

Tabla 7 resume los diversos roles que puede tomar la permeabilidad frente a la erosión hídrica del suelo.

La **materia orgánica**, es directamente proporcional a la erodabilidad del suelo y siempre toma un rol de resistencia a la erosión debido a que disminuye la erodabilidad del suelo.

El efecto del **factor textural**, es directamente proporcional a la erodabilidad del suelo, e influye en potencia de 1,14 en el cálculo final de la erodabilidad. A medida que aumenta la presencia de minerales primarios y disminuye la de arcilla, el factor textural aumenta la erodabilidad del suelo, y con ello la vulnerabilidad a la erosión hídrica.

Tabla 6 Rol de la Estructura en la Erosión hídrica según la erodabilidad del suelo Ecuación 9

Estructura	Erodabilidad	Rol frente erosión hídrica
Granular muy fina	Disminuye	Protección frente la erosión
Granular fina	Neutro	Neutro
Granular grueso	Aumenta	Favorecimiento a la erosión
Blocosa	Aumenta	Favorecimiento a la erosión
Laminar	Aumenta	Favorecimiento a la erosión
Prismoide	Aumenta	Favorecimiento a la erosión
Masiva	Aumenta	Favorecimiento a la erosión

Tabla 7 Rol de la Permeabilidad en la Erosión hídrica según la erodabilidad del suelo Ecuación 9

Permeabilidad	Erodabilidad	Rol frente erosión hídrica
Rápida	Disminuye	Protección frente la erosión
Moderadamente rápida	Disminuye	Protección frente la erosión
Moderada	Neutro	Neutro
Lenta	Aumenta	Favorecimiento a la erosión
Muy lenta	Aumenta	Favorecimiento a la erosión

3.3.1 Análisis de erodabilidad a escala cuenca

La Figura 18 señala la erodabilidad del suelo de las diversas series de suelo de la cuenca de Rapel. Como fue mencionado previamente en la sección 3.1 Ordenes de suelos en la cuenca de Rapel), los suelos correspondientes a la cuenca son del orden de Alfisol, Molisol, Inceptisol, Vertisol y Entisol. Por lo cual la discusión de erodabilidad de series de suelo a escala cuenca, será desarrollada según ordenes.

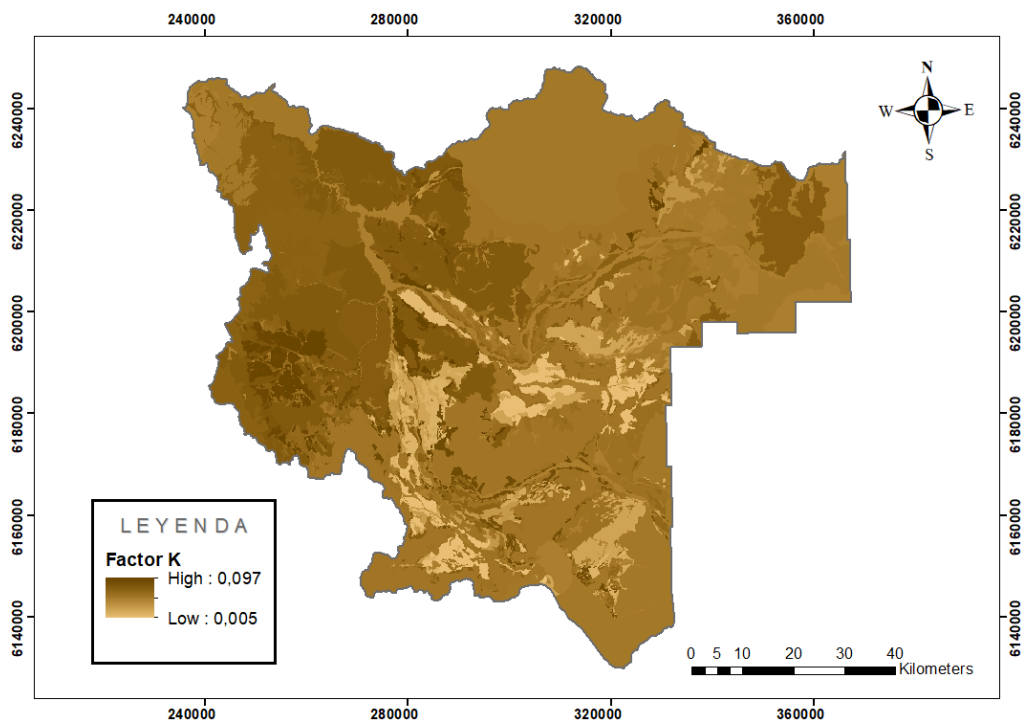


Figura 18 Mapa factor K. Erodabilidad del suelo a escala de cuenca

3.3.1.1 Alfisol

En su totalidad, el orden Alfisol representa al 45,1% del área total de la cuenca de Rapel, ocupando la mayor superficie de la cuenca.

La Tabla 8 muestra el promedio ponderado de los cuatro parámetros que influyen en la erodabilidad del suelo, junto al valor final K de erodabilidad de suelo para el orden Alfisol de la cuenca de Rapel.

Tabla 8 Valores ponderados del orden Alfisol de la cuenca de Rapel

Factor	Valor	Factor	Valor
Textura	7275	Estructura	1,76
Materia Orgánica	2,67	Permeabilidad	2,23
Erodabilidad (K)		0,062	

El promedio ponderado del factor textural es alto, lo cual señala una alta presencia de arena y limo; por otra parte, el contenido de materia orgánica es bajo. Estos resultados son

esperables debido a la eluviación de arcillas, y a los delgados epipedones de materia orgánica. Estas características implican en un aumento de la erodabilidad del suelo.

El promedio ponderado de permeabilidad tiende a *Moderadamente rápida*, señalando una resistencia a la erosión del suelo debido a la disminución de la erodabilidad. Con respecto al promedio ponderado de estructura, esta tiende a *Granular fino*, señalando una nula incidencia en el aumento o disminución de erodabilidad del suelo.

La Figura 19 muestra un rango amplio de índice de erodabilidad para el orden Alfisol, pero el promedio ponderado alcanza un $K= 0,060$; dando cuenta de un valor alto de vulnerabilidad a la erosión.

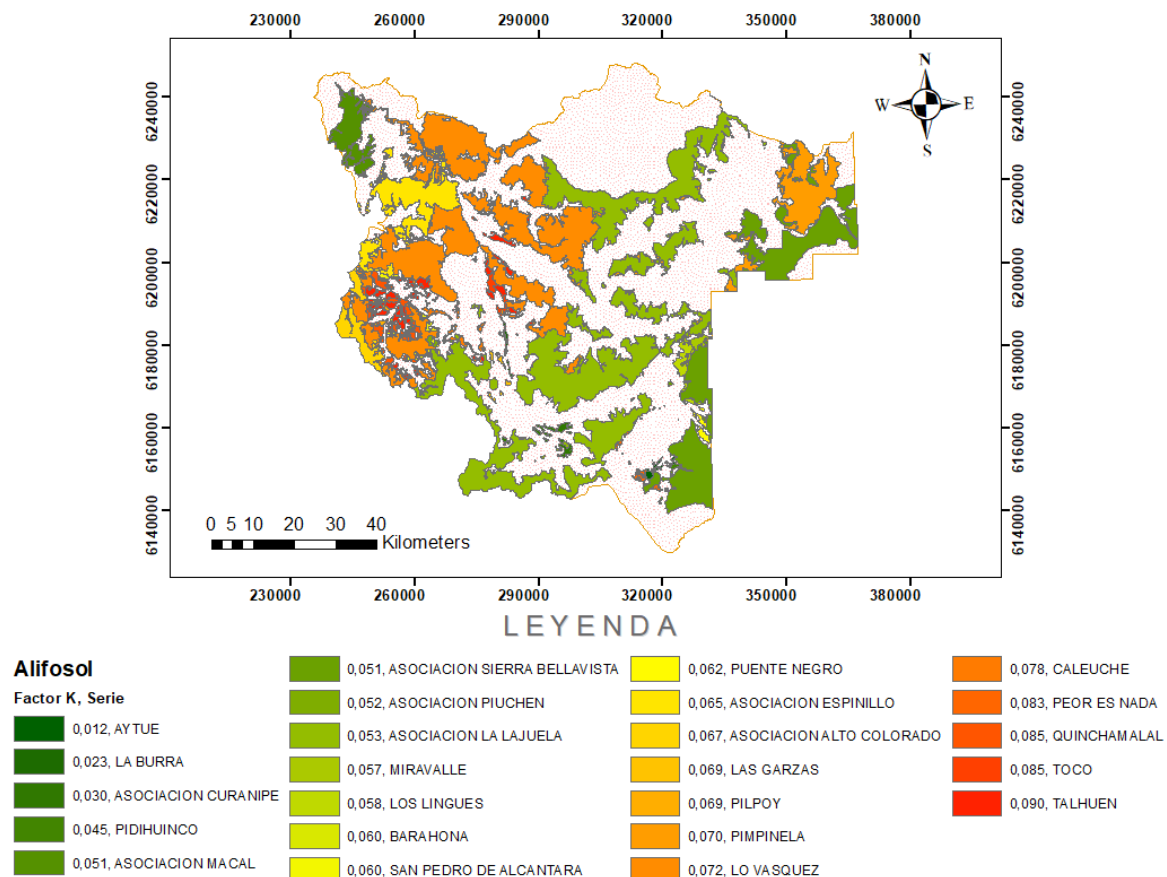


Figura 19 Erodabilidad por series de suelo del orden Alfisol

3.3.1.2 Molisol

En su totalidad, el orden Molisol representa al 19,22% del área total de la cuenca de Rapel, ocupando el segundo lugar en superficie de la cuenca. La Tabla 9 muestra el promedio ponderado de los cuatro parámetros que influyen en la erodabilidad del suelo, junto al valor final K de erodabilidad de suelo para el orden Molisol de la cuenca de Rapel.

Tabla 9 Valores ponderados del orden Molisol de la cuenca de Rapel

Factor	Valor	Factor	Valor
Textura	6340	Estructura	1,48
Materia Orgánica	3,37	Permeabilidad	2,33
Erodabilidad (K)		0,050	

El promedio ponderado del factor textural alcanza los 6340, señalando un alto contenido de Arena y Limo en los primeros centímetros del suelo. El promedio ponderado de materia orgánica es de 3,5%; indicando una buena resistencia a la erosión hídrica. Cabe señalar que la serie Gatera, perteneciente al Orden Montisol, presenta el mayor contenido de materia orgánica de toda la cuenca de Rapel (MO=10%).

El promedio ponderado de estructura tiende a *Granular muy fino* y *Granular fino*, indicando efectos de resistencia y neutralidad a la erosión hídrica. El promedio ponderado de permeabilidad tiende a *Moderadamente Rápida*, señalando resistencia a la erosión hídrica con respecto a la erodabilidad.

La Figura 20 muestra un rango amplio de índice de erodabilidad para el orden Molisol, siendo el promedio ponderado de K= 0,049; dando cuenta de un valor medio bajo de erodabilidad, lo cual está fuertemente relacionado al alto contenido de materia orgánica, tipo de estructura y permeabilidad que presenta el Orden Molisol en la cuenca de Rapel.

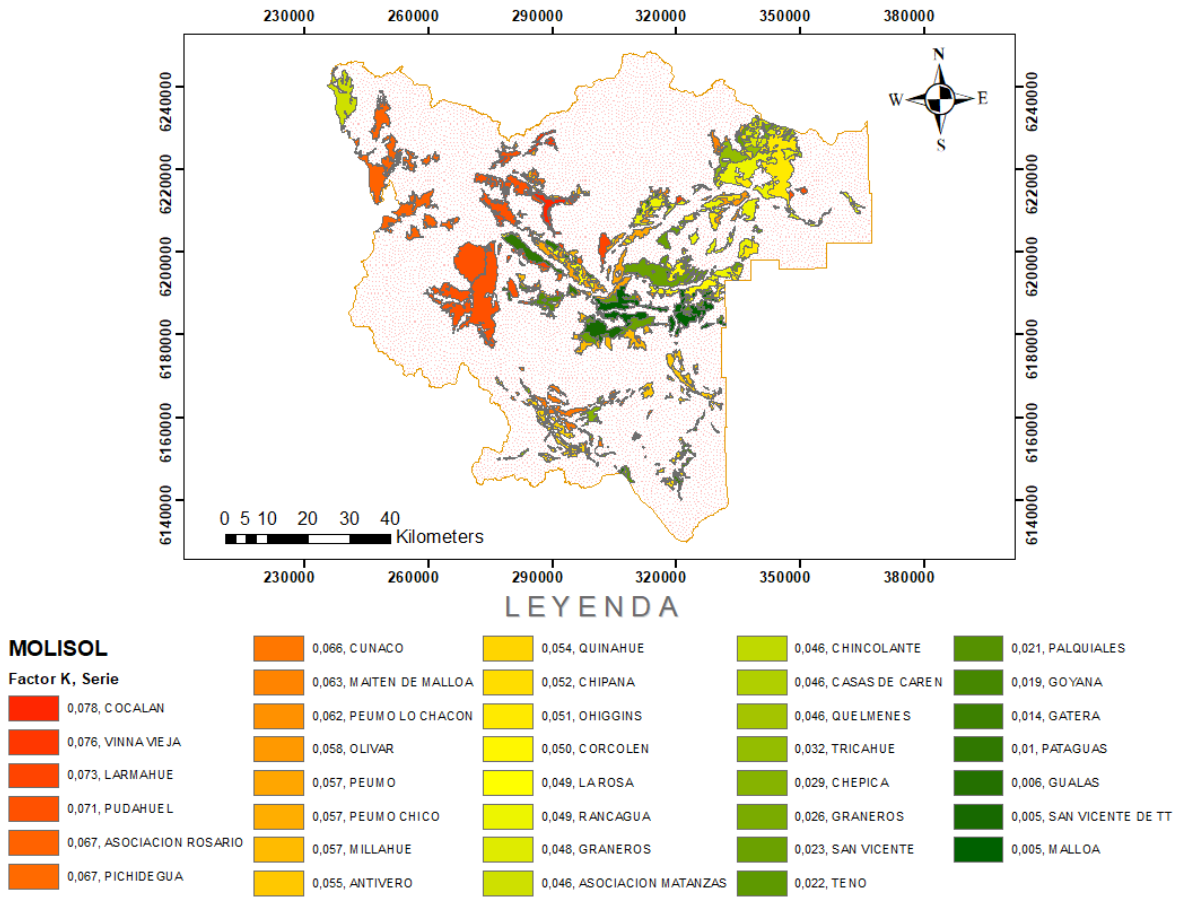


Figura 20 Erodabilidad por series de suelo del orden Molisol

3.3.1.3 Inceptisol

En su totalidad, el orden Inceptisol representa al 9,8% del área total de la cuenca de Rapel. La Tabla 10 muestra el promedio ponderado de los cuatro parámetros que influyen en la erodabilidad del suelo, junto al valor final K de erodabilidad de suelo para el orden Inceptisol de la cuenca de Rapel.

Tabla 10 Valores ponderados del orden Inceptisol de la cuenca de Rapel

Factor	Valor	Factor	Valor
Textura	6875	Estructura	2,16
Materia Orgánica	3	Permeabilidad	2,45
Erodabilidad (K)			0,058

El promedio ponderado del factor textural alcanza $M= 6800$, señalando un moderadamente alto contenido de Arena y Limo en los primeros centímetros del suelo. El promedio ponderado de materia orgánica para el orden es de $MO= 3\%$, indicando una baja resistencia a la erosión.

El promedio ponderado de estructura tiende a *Granular fino*, indicando efectos de neutralidad a la erosión hídrica con respecto a este índice. El promedio ponderado de permeabilidad tiende a *Rápida y Moderadamente rápida*, señalando un efecto de protección contra la erosión hídrica al disminuir la erodabilidad del suelo.

La Figura 21 muestra un rango amplio de índice de erodabilidad para el orden Inceptisol, siendo el promedio ponderado de $K= 0,058$; dando cuenta de un valor moderado de erodabilidad.

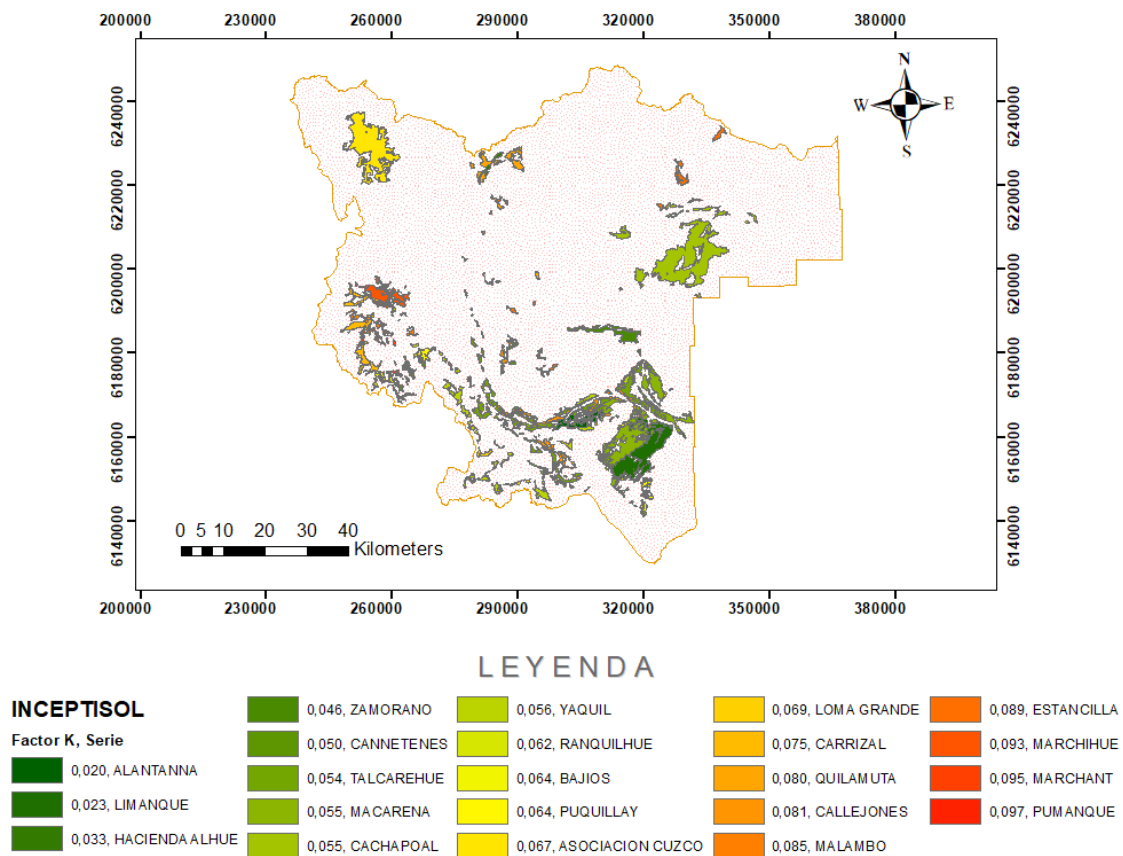


Figura 21 Erodabilidad por series de suelo del orden Inceptisol

3.3.1.4 Vertisol

En su totalidad, el orden Vertisol representa al 0,80% del área total de la cuenca de Rapel y están ubicados principalmente al sur centro de la cuenca de Rapel. La Tabla 11 muestra el promedio ponderado de los cuatro parámetros que influyen en la erodabilidad del suelo, junto al valor final K de erodabilidad de suelo para el orden Vertisol de la cuenca.

Tabla 11 Valores ponderados del orden Vertisol de la cuenca de Rapel

Factor	Valor	Factor	Valor
Textura	1312	Estructura	2,64
Materia Orgánica	4,39	Permeabilidad	4,00
Erodabilidad (K)		0,014	

El promedio ponderado del factor textural alcanza los M= 1312, señalando un alto contenido de Arcilla en los primeros centímetros del suelo, y por consiguiente, una baja vulnerabilidad a la erosión producto de la disminución de la erodabilidad. Cabe señalar que el material parental de estos suelos lo constituyen sedimentos con una elevada proporción de arcillas esmectíticas. El promedio ponderado de MO para el orden en la cuenca de Rapel es de 4,39%; siendo el más alto ponderado de todos los ordenes, e indicando una alta resistencia del suelo a la erosión.

El promedio ponderado de estructura tiende a *Granular fino* y *Granular grueso*, indicando efectos de neutralidad y favorecimiento a la erosión hídrica. El promedio ponderado de permeabilidad tiende a *Lenta*, lo cual da cuenta de un efecto de favorecimiento a la erosión hídrica debido al aumento de la erodabilidad. Este fenómeno se correlaciona con la impermeabilidad que caracteriza al Orden Vertisol.

La Figura 22 muestra un rango amplio de índice de erodabilidad para el orden Vertisol, siendo el promedio ponderado de $K= 0,014$; dando cuenta de un valor bajo de erodabilidad.

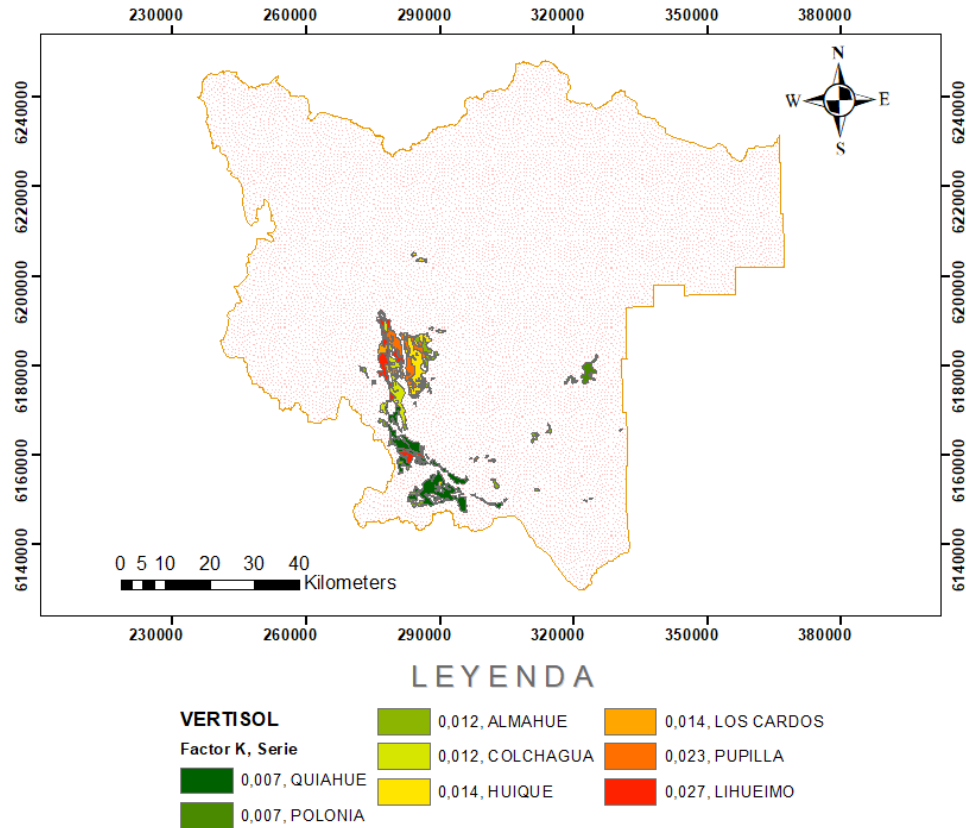


Figura 22 Erodabilidad por series de suelo del orden Vertisol

3.3.1.5 Entisol

En su totalidad, el orden Entisol representa al 0,80% del área total de la cuenca de Rapel y están ubicados principalmente al su oeste de la cuenca.

La Tabla 12 muestra el promedio ponderado de los cuatro parámetros que influyen en la erodabilidad del suelo, junto al valor final K de erodabilidad de suelo para el orden Entisol de la cuenca de Rapel.

Tabla 12 Valores ponderados del orden Entisol de la cuenca de Rapel

Factor	Valor	Factor	Valor
Textura	7461	Estructura	3,12
Materia Orgánica	1,68	Permeabilidad	1,75
Erodabilidad (K)			0,075

El promedio ponderado del factor textural alcanza los 7461, señalando un alto contenido de Arena y Limo en los primeros centímetros del suelo. Cabe señalar que el material parental de estos suelos contiene rocas basálticas, cuya dureza ronda los 4,8 - 6,5 en el índice de Mohs, por lo cual estos suelos se caracterizan por un desarrollo lento debido a la baja meteorización, lo cual conlleva una alta concentración de arenas basálticas.

El promedio ponderado de MO para el orden en la cuenca de Rapel es de 1,7%; siendo la más baja de todos los ordenes. Este fenómeno es debido al bajo desarrollo que presentan los suelos.

El promedio ponderado de estructura tiende a *Granular grueso*, implicando es un aumento de erodabilidad y con ello favoreciendo a la erosión hídrica.

El promedio ponderado de permeabilidad tiende a *Moderadamente rápida*, lo cual da cuenta de un efecto de disminución de la erodabilidad. Cabe señalar que las series Mancuman y Tinguiririca, representantes del 62,4% de la superficie total del orden Entisol en la cuenca, presentan permeabilidad Rápida.

La Figura 23 muestra las tres series representativas del orden Entisol en la cuenca, las cuales presentan altos valores de erodabilidad y llegan a ponderar 0,075.

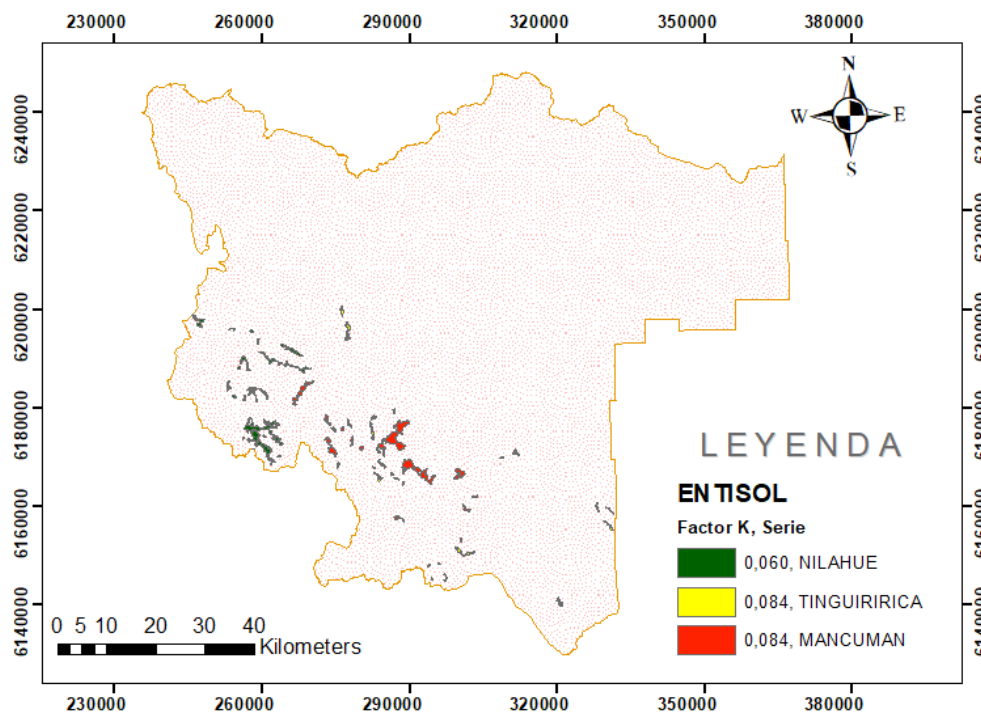
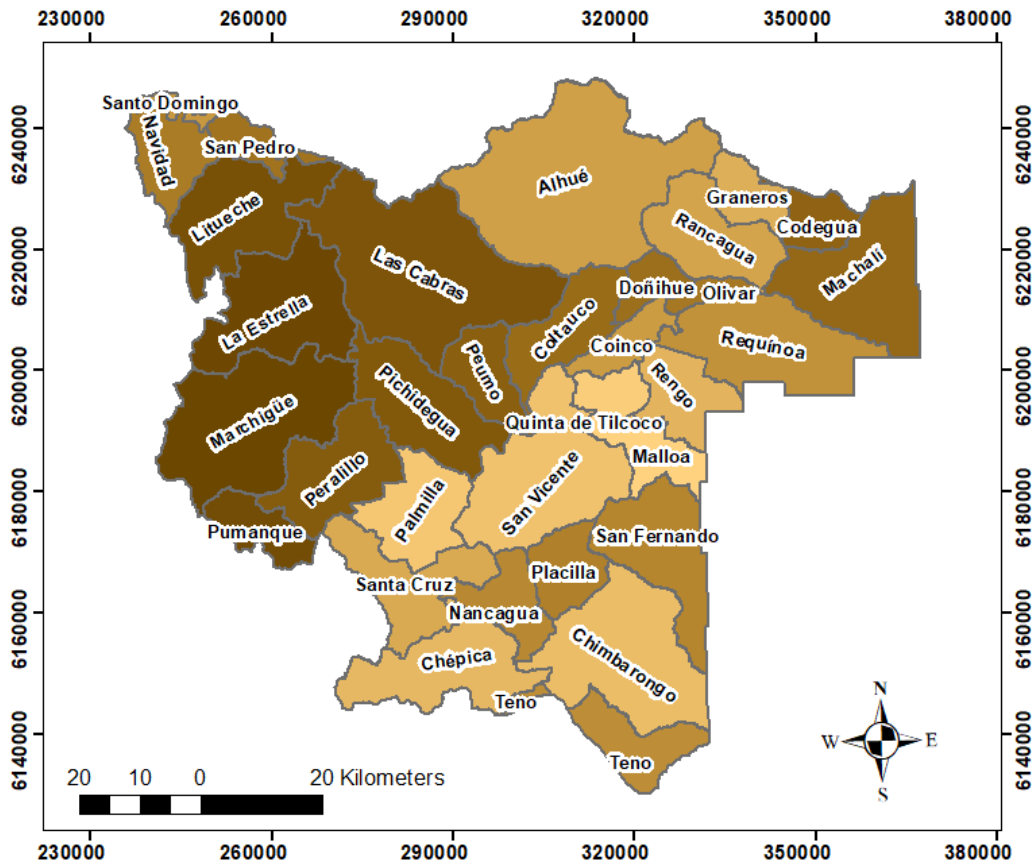


Figura 23 Erodabilidad por series de suelo del orden Entisol

3.3.2 Análisis erodabilidad a nivel comunal

La Figura 24 muestra la variación en erodabilidad del suelo por comuna, dando cuenta de un promedio ponderado de las características de las series de suelo correspondientes a la superficie comunal.

Las comunas con valores de erodabilidad extremos, corresponden a Malloa y Marchigüe, con un K de 0,037 y $0,074 \left(\frac{Mg}{ha} \right) \cdot \left(\frac{MJ \cdot mm}{ha \cdot h \cdot año} \right)^{-1}$ respectivamente; a continuación se analizan las peculiaridades de cada comuna que dan cuenta de cada valor extremo de erodabilidad.



LEYENDA

Factor K; Comuna		
0,037; Malloa	0,051; Alhué	0,056; Coltauco
0,038; Quinta de Tilcoco	0,051; Coinco	0,057; Machalí
0,042; Palmilla	0,051; Santo Domingo	0,059; Codegua
0,044; San Vicente	0,051; Requínoa	0,059; Peumo
0,046; Chimbarongo	0,051; Teno	0,060; Peralillo
0,046; Chépica	0,052; Nancagua	0,060; Pichidegua
0,047; Rengo	0,052; San Fernando	0,066; Las Cabras
0,048; Graneros	0,052; Placilla	0,066; Litueche
0,048; Santa Cruz	0,053; Navidad	0,067; Pumanque
0,050; Rancagua	0,053; Olivar	0,067; La Estrella
	0,053; San Pedro	0,074; Marchigüe
	0,054; Doñihue	

Figura 24 Mapa factor K. Erodabilidad del suelo a nivel comunal

3.3.2.1 Mínima comunal, Malloa

El índice de erodabilidad para la comuna de Malloa alcanza un valor de $K= 0,037$, lo cual se traduce en una baja vulnerabilidad a la erosión hídrica. En esta comuna predominan los suelos Molisoles y Alfisoles, alcanzando el 47% y 43% de la superficie total comunal respectivamente. La Figura 25 muestra la ubicación de los ordenes Molisoles y Alfisoles en la comuna de Malloa.

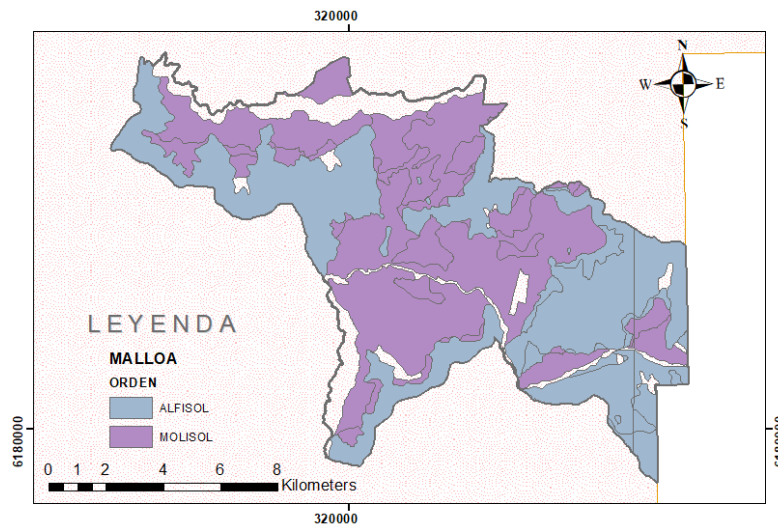


Figura 25 Ordenes Molisol y Alfisol en la comuna de Malloa

El orden Molisol es representado principalmente por la serie Malloa, la cual presenta el índice de erodabilidad más bajo a nivel de cuenca ($K=0,005$), e influye enormemente en las características del suelo de la comuna. Los suelos Molisoles se caracterizan por una alta concentración de materia orgánica en los primeros centímetros del suelo, lo cual juega un rol de protección contra la erosión hídrica.

La Asociación la Lajueta, corresponde a la serie más representativa del orden Alfisol en la comuna, y presenta un índice de erodabilidad promedio ($K=0,053$).

3.3.2.2 Máxima comunal, Marchigüe

El índice de erodabilidad para la comuna de Marchigüe alcanza un valor de $K= 0,074$, lo cual se traduce en una alta vulnerabilidad a la erosión hídrica. En esta comuna predominan los suelos Alfisoles, Molisoles e Inceptisoles, alcanzando el 68,6%, 14% y 12% de la superficie total comunal respectivamente. La Figura 26 muestra la ubicación de los ordenes Alfisoles, Molisoles e Inceptisoles en la comuna de Marchigüe.

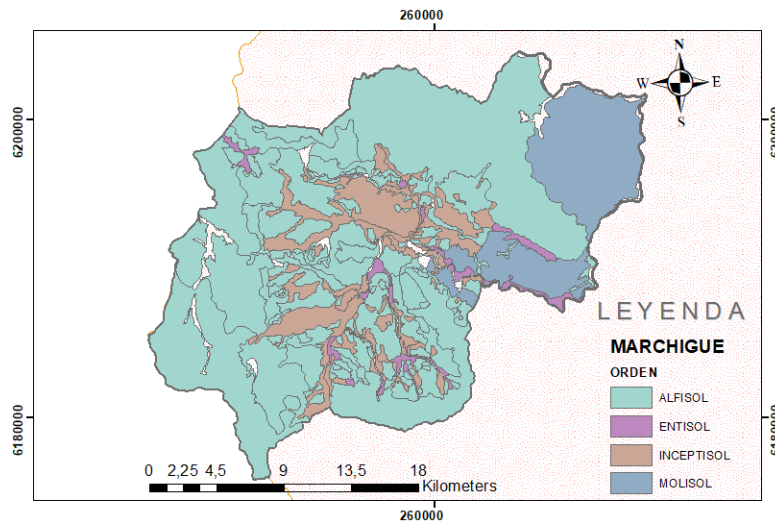


Figura 26 Ordenes Alfisol, Molisol, Inceptisol y Entisol en la comuna de Marchigüe

Las series más representativas del orden Alfisol corresponde a Lo Vasquez, Asociación alto colorado y Talhuen, mientras que para los ordenes Molisol e Inceptisol, podemos mencionar a las series Pudahuel y Marchigüe como las con mayor presencia en cada orden respectivo.

La alta vulnerabilidad a la erosión se correlaciona con la alta presencia del orden Alfisol, que entre sus principales características se encuentra la baja presencia de arcillas en los primeros centímetros de suelo producto de la eluviación de las mismas.

Sumado a lo anterior, la serie Pudahuel perteneciente al orden Molisol, presenta un alto valor textural ($M \approx 8100$) y un bajo porcentaje de materia orgánica ($MO=2,1\%$); lo cual favorece aún más la vulnerabilidad a la erosión de la comuna.

El orden Inceptisol, representado mayoritariamente por la serie Marchigüe, presenta un alto valor textural ($M \approx 8100$) y muy baja materia orgánica ($MO=0,06\%$); lo cual se correlaciona al poco desarrollo que presentan los suelos Inceptisol.

IV. FACTOR LS. LONGITUD DE LADERA Y ESCARPADO DE PENDIENTE

El factor de longitud de la ladera (L) y escarpado de la pendiente (S), influyen considerablemente en las tasas de erosión de un suelo, y evalúan en conjunto el relieve del terreno (ICONA 1991), es por ello que ambos factores se estudian en conjunto como factor LS, el cual es considerado una magnitud adimensional.

El factor LS es uno de los principales factores que determinan la emisión de sedimentos de las cuencas, debido a que la pendiente aumenta el coeficiente de escorrentía, pues una misma microtopografía embalsa más agua en terrenos tendidos que en terreno empinados. A su vez, al aumentar la escorrentía superficial, crece la erosión hídrica, que lima el microrrelieve del terreno, alisando la ladera y reduciendo las microdepresiones (González Fuertes y Col. 2014).

El estudio del efecto del relieve en la erosión hídrica mediante el uso de ArcGIS, precisa el uso de un Modelo de elevación digital (DEM) (Anexo. B.2. Modelo de elevación digital (DEM)). La imagen DEM provienen de ASTER, las cuales son brindadas por el centro *Land Processes Distributed Active Archive Center* (LP DAAC) (NASA 2011).

4.1 Método de calculo

La forma de la pendiente y la interacción del ángulo con la longitud de la pendiente, tiene un efecto considerable en la magnitud de la erosión de un suelo, por lo cual el relieve es uno de los principales factores que determinan la perdida de suelo en el análisis USLE. Como resultado de esta interacción, el efecto de longitud y grado de pendiente debe ser siempre considerados en conjunto (Edwards 1987)

Varios estudios usan la Ecuación 11, sugerida por (Moore y Wilson 1992) para calcular el factor LS

$$LS = \left(\frac{A_s}{22,13} \right)^m \cdot \left(\frac{\sin \beta}{0,09} \right)^n \quad \text{Ecuación 11}$$

Siendo A_s un factor que se puede calcular a partir del algoritmo de flujo de dirección múltiple (Freeman 1991) a través de la herramienta *Raster Calculator* de ArcGIS, y β corresponde al ángulo de la pendiente.

Los factores m y n , corresponden a exponentes de longitud e inclinación de pendiente respectivamente, los cuales pueden variar entre 0,2 y 0,6 para m , y entre 1,0 y 1,3 para n . Bajos valores de m y n corresponden a prevalencia de flujo laminar, por otra parte, altos valores son asignados para flujo de arroyo.

Los valores 22,13 y 0,09 son valores estándar de longitud y pendiente indicados en el manual USLE (Wischmeier, Smith, y Col 1978)

El factor LS fue calculado en el presente trabajo por medio de la herramienta *Raster Calculator* del software ArcGIS, a partir de la imagen DEM de 30 m (Figura 27) , siendo la relación más adecuada para la integración con SIG la propuesta por (Moore y Wilson 1992), basada en la teoría del poder de flujo unitario que se detalla a continuación.

$$LS = (m + 1) \cdot \left(\frac{FA \cdot cellsize}{22,13} \right)^m \cdot \left(\frac{\sin(slope\ angle)}{0,09 \cdot 0,01745} \right)^n \quad \text{Ecuación 12}$$

Donde FA es la acumulación de flujo obtenido mediante el algoritmo de *acumulación de flujo* de ArcGIS (Lee 2004), $cellsize$ el tamaño de la celda de los datos DEM el cual corresponde a 30m, $slope\ angle$ el ángulo de pendiente en grados, y 0,01745 un parámetro para convertir grados a radianes.

Debido a las características de la cuenca de Rapel, con alto grado de erosión por riachuelo, se recomiendan valores de 0.5 para m y 0.3 para n. (Mitasova y Mitsova 2001) (Liu y Col 2000)

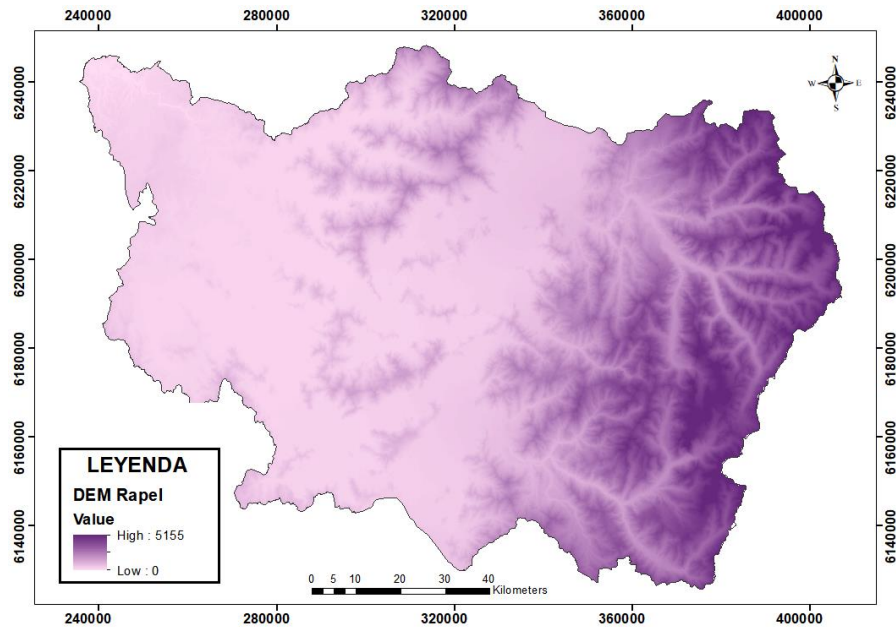
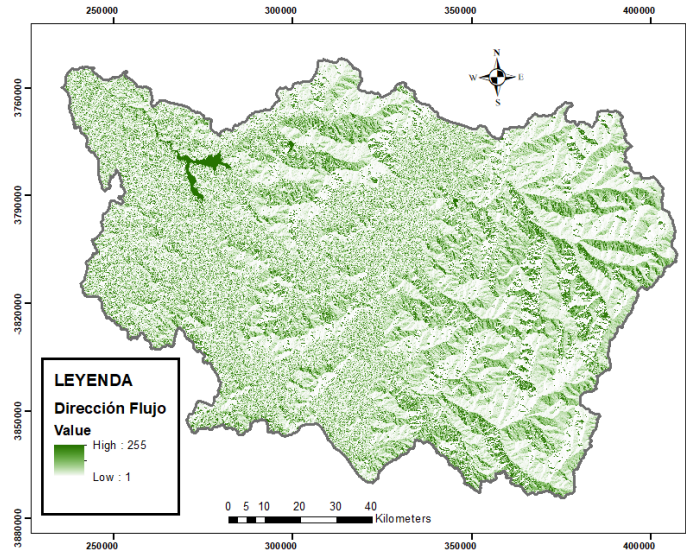


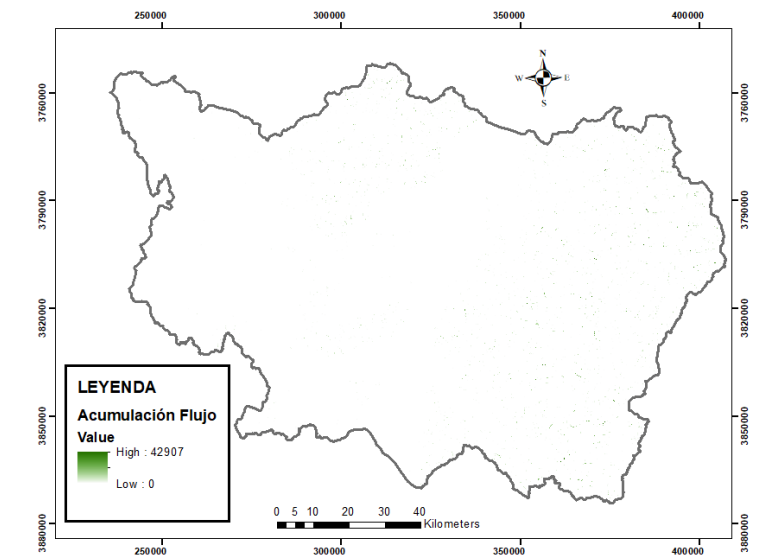
Figura 27 DEM cuenca de Rapel. (NASA 2011)

La determinación de la Acumulación de flujo requiere previamente la identificación de la Dirección de flujo, para ello se empleó la herramienta *Flow Direction* del software ArcGis. Para el cálculo del ángulo de la pendiente se usó la herramienta *slope* del mismo software. Los mapas de Dirección, Acumulación de flujo y Slope Angle, se pueden observar en la Figura 28. Cabe señalar que el área de estudio fue acotada según lo descrito previamente en la sección 2.2 Limitación del área de estudio en la cuenca de Rapel).

(a)



(b)



(c)

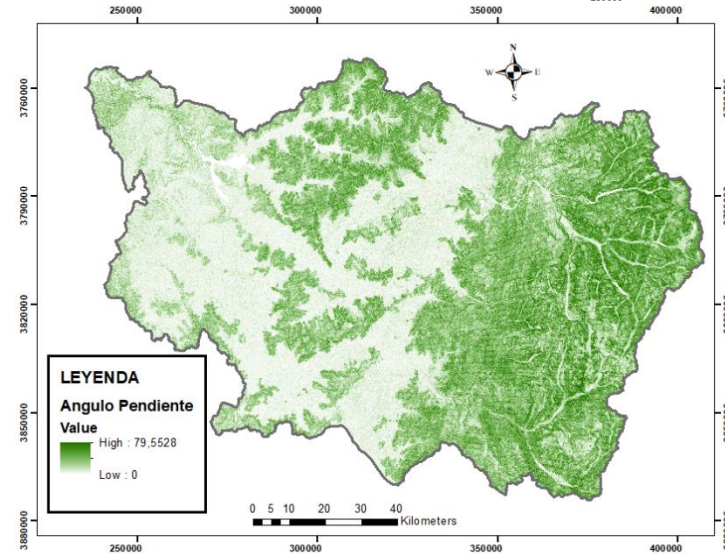


Figura 28 a) Dirección de Flujo, b) Acumulación de flujo, c) Angulo de Pendiente

4.2 Análisis de resultado

La influencia del relieve en la erosión hídrica es representada por el factor LS, cual da cuenta del aumento de la erosión con el ángulo y longitud de la pendiente. Esta influencia es calculada a partir de la Ecuación 12, cuyos principales datos de entrada corresponden al ángulo de la pendiente y al flujo acumulado.

El factor LS es directamente proporcional al seno del ángulo de la pendiente y al flujo acumulado de la cuenca hidrográfica. El primero da cuenta de un aumento en la erosión a medida que la pendiente se va acercando a los 45°, a la vez el flujo acumulado, el cual representa la longitud del gradiente de la pendiente, señala que cuanto mayor sea la longitud de una determinada inclinación (ángulo de la pendiente en ladera), mayor será la erosión hídrica producto del relieve.

Debido a que la USLE (Ecuación 1), corresponde a un producto simple entre aquellos factores involucrados, el factor LS se caracteriza por ser un índice potenciador del efecto de la erosividad de la precipitación en el cálculo final de la erosión hídrica; esto es debido a que la influencia topográfica rara vez alcanza valores menores a 1.

4.2.1 Análisis factor topográfico escala de cuenca

Cuanto mayor sea el valor del factor LS, mayor será el alcance erosivo de las precipitaciones, esto se debe al efecto que juega la pendiente de la ladera sobre las gotas de lluvia al impactar en el suelo, ya que producto al abrupto cambio de pendiente la escorrentía superficial se verá favorecida sobre la infiltración del agua en el suelo.

La Figura 29, muestra el mapa del factor LS a escala de cuenca, indicando como el valor de este índice cambia en función del relieve en la cuenca.

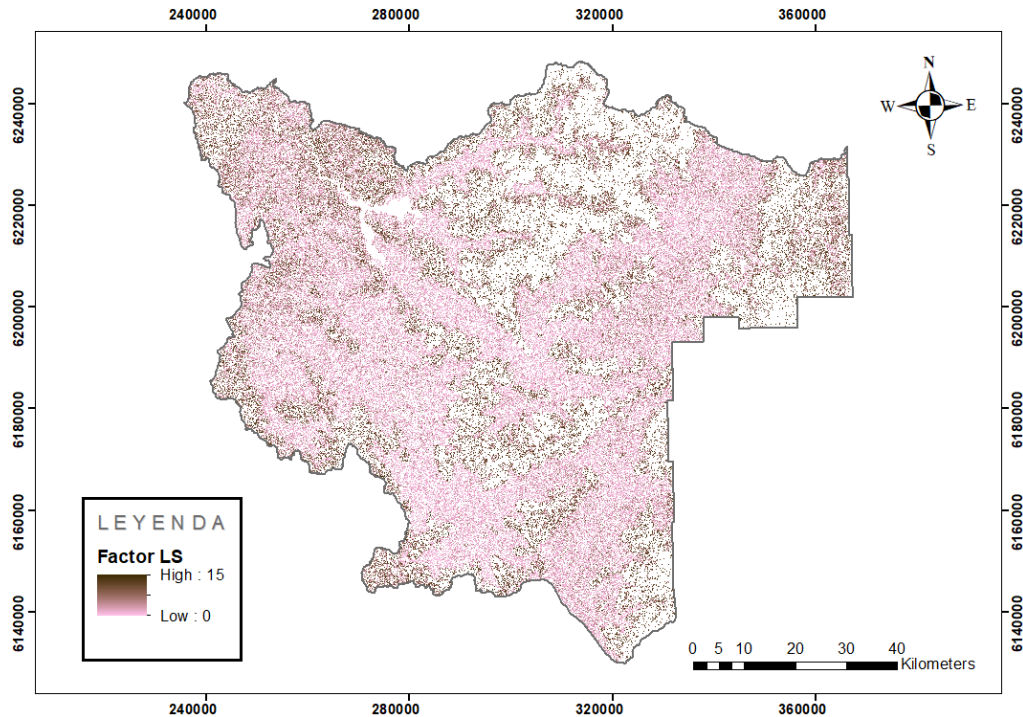


Figura 29 Mapa factor LS. Influencia del relieve en la erosión a escala cuenca

La Figura 29 muestra que en las zonas cultivables de la cuenca de Rapel, el factor LS oscila entre 0 y un máximo valor de 15, señalando a los sectores de coloración café, que corresponden a la parte media de la ladera, como los más vulnerables frente a la erosividad de la precipitación.

Los sectores de tonalidad rosa corresponden a aquellas áreas de la cuenca en que la erosividad de la precipitación no se ve gravemente potenciada por la pendiente. Cabe señalar que cuanto más cercano a 0 sea el factor LS, predominará el proceso de sedimentación sobre el de erosión, implicando en un enriquecimiento del suelo.

Las zonas blancas corresponden a las cimas de cerros, acantilados de ríos y cuerpos de agua, por lo cual la agricultura no puede ser desarrollada.

4.2.2 Análisis factor topográfico nivel comunal

La Figura 30 muestra la variación del promedio del factor LS según comuna. En esta figura se puede observar que los valores extremos comunales para el factor LS corresponden a Olivar y Alhué, con índices de 2,039 y 7,214 respectivamente.

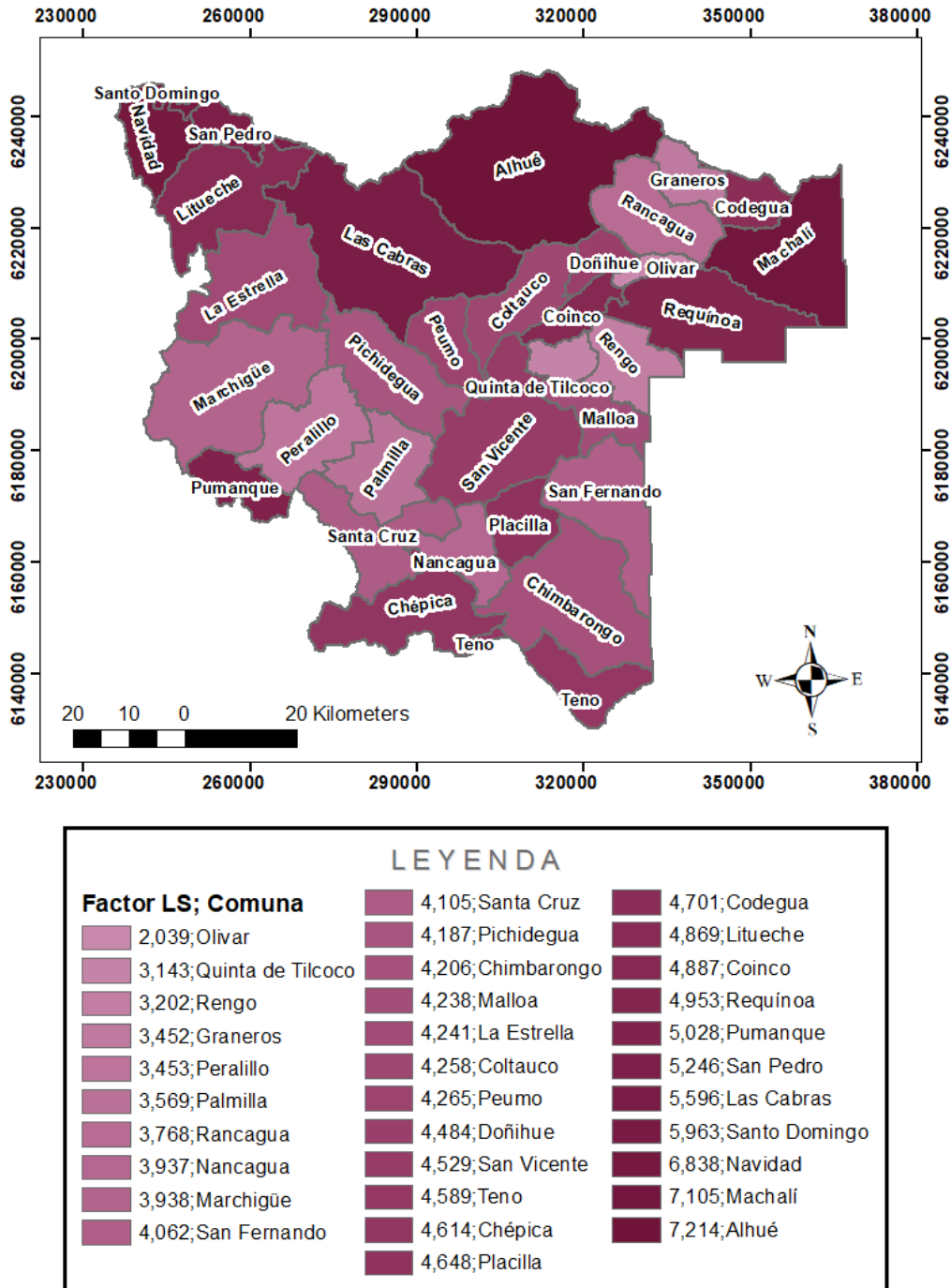


Figura 30 Mapa factor LS. Influencia de la topografía en la erosión a nivel comunal

4.2.2.1 Mínima comunal, Olivar

La comuna de Olivar presenta una baja variación de pendiente, encontrando estos valores bajo los 13°. El histograma de la Figura 31 esquematiza lo anteriormente señalado.

Este análisis indica que la superficie de la comuna es mayoritariamente plana, por lo cual el gradiente de la pendiente a nivel comunal favorecería el proceso de sedimentación sobre el de arrastre de suelo por la precipitación, lo cual se correlacionaría con el bajo factor LS.

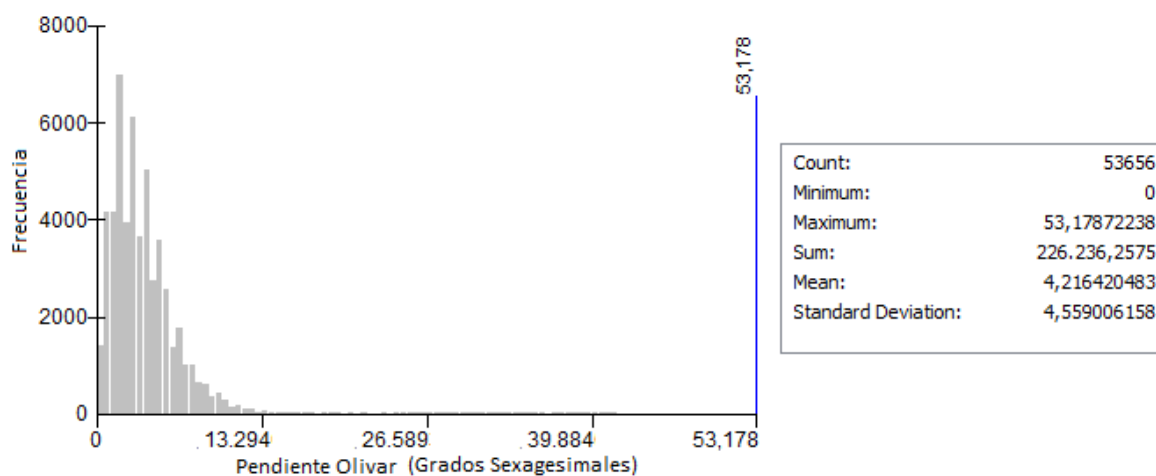


Figura 31 Histograma de pendientes en grados de la comuna de Olivar

4.2.2.2 Máxima comunal, Alhué

La comuna de Alhué presenta un paisaje de alta montaña, constituido por mesetas y cordones pertenecientes a la cordillera de la costa central. El relieve abrupto de la zona abre paso a la presencia del cordón montañoso de Alto de Cantillana y a amplias cuencas.

La Figura 32 corresponde al histograma de pendientes de la comuna de Alhué, en el cual se puede observar una gran variación de pendientes, tal fenómeno da cuenta de una superficie comunal mayoritariamente escarpada, correlacionándose con el alto valor promedio del factor LS comunal.

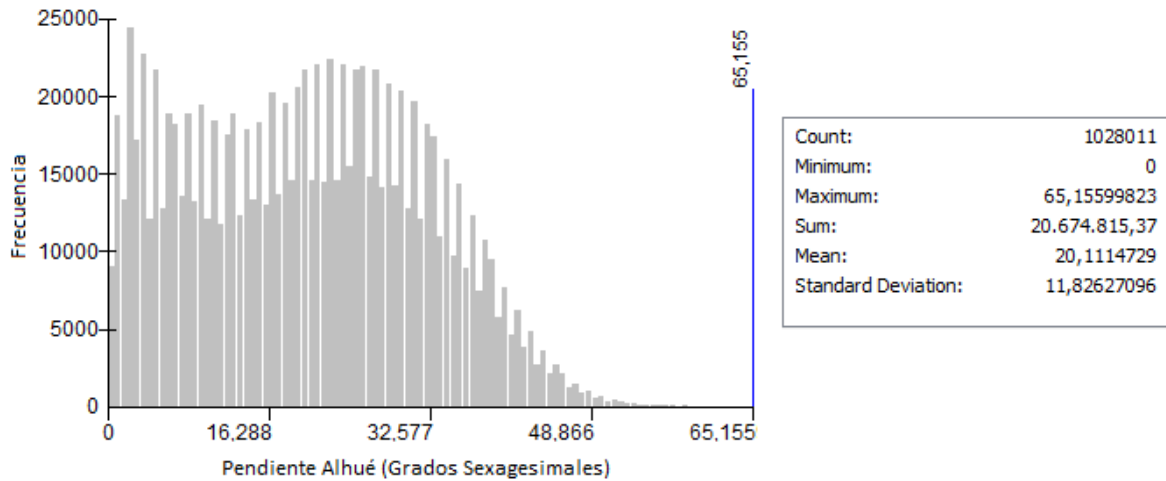


Figura 32 Histograma de pendientes en grados de la comuna de Alhué

A pesar de haber desarrollado un tratamiento de datos para la comuna de Alhué, el cual se basó en prescindir de aquellos puntos en los que el gradiente de la pendiente fuera lo suficientemente abrupto como para impedir la actividad agrícola, la Ecuación 12 arroja que el paisaje topográfico influiría en gran medida en el efecto erosivo de la precipitación, implicando en un alto favorecimiento a la ocurrencia de la erosión hídrica.

V. FACTOR C. CUBIERTA VEGETAL.

La cubierta vegetal es, después de la topografía, el segundo factor más importante que controla el riesgo de erosión del suelo frente a la fuerza erosiva de las precipitaciones, controlando no sólo la energía con la que llegan las gotas de lluvia a la superficie del suelo, sino también la velocidad de la escorrentía superficial (ICONA 1991). La pérdida de suelo es por lo tanto muy sensible a la cubierta vegetal (Biesemans, Van Meirvenne, y Gabriels 2000), debido a que esta protege al suelo de la disgregación de partículas producto a la energía de impacto de gotas de lluvia.

El factor C de la USLE recoge la influencia de la cubierta vegetal natural, junto al manejo y disposición de los cultivos y los residuos vegetales producidos por los mismos sobre el suelo. Cabe señalar que el factor de cubierta vegetal es una magnitud adimensional, ya que corresponde a la razón de pérdida de suelo entre la misma área con y sin cubierta vegetal.

En la *Revised Universal Soil Loss Equation* (RUSLE) (Renard et al. 1997), la cual corresponde a una versión revisada de la USLE, el factor C se subdivide en 5 subfactores separados, lo cuales corresponden a: el uso anterior del suelo, la cubierta del dosel, la cobertura de la superficie, la rugosidad de la superficie y la humedad del suelo, respectivamente.

A escala de cuenca, es casi imposible estimar el C utilizando las directrices RUSLE, esto debido a la falta de datos suficientemente detallados, por lo cual en el presente trabajo se hará uso de *Imágenes Satelitales Landsat 8*. (Anexo B.3. Imágenes Satelitales Landsat 8)

5.1 Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada

El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) se utiliza para estimar la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación con base a la medición de la intensidad de la radiación de ciertas bandas del espectro electromagnético que la vegetación emite o refleja.

El cálculo de este factor es a través de la diferencia entre el infrarrojo cercano (que la vegetación refleja fuertemente) y la luz roja (que la vegetación absorbe), obteniéndose siempre valores NDVI entre -1 y +1. La Ecuación 13 da cuenta de la razón de cálculo de este factor.

$$NDVI = \left(\frac{IR_{cercano} - Rojo_{visible}}{IR_{cercano} + Rojo_{visible}} \right) \quad \text{Ecuación 13}$$

Las bandas espectrales de infrarrojo cercano y luz roja visible, son obtenidas a partir de imágenes satelitales. Es importante señalar que la construcción de esta imagen es fundamental para el cálculo del factor de cubierta vegetal.

5.2 Método de calculo

Dado que los valores del NDVI tienen correlación con el factor C (Tweddles, Eschlaeger, y Seybold 2000) es común utilizar el análisis de correlación para estimar los valores del factor C para las clases de uso del suelo o cobertura de la tierra en la evaluación de la erosión (Lin, Lin, y Chou 2006)

Para la construcción de un NDVI representativo de la vegetación invernal de la cuenca de Rapel, se emplearon imágenes de bandas espectrales Landsat 8 (USGS 2018) correspondiente a los meses de Mayo, Junio, Julio y Agosto 2018 que se muestran en la

Figura 34; cabe señalar que estas imágenes corresponden a los cuadrantes 118 - 160 y 119 - 160 del sistema WRS-2 (Figura 33). (Anexo B.3.2 Cuadrícula Landsat)

El coeficiente de vegetación normalizado por mes se muestra en

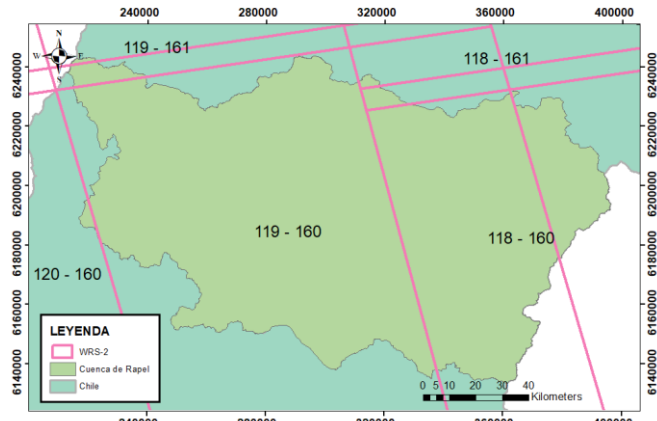


Figura 33 Captaciones WRS-2 para Cuenca de Rapel

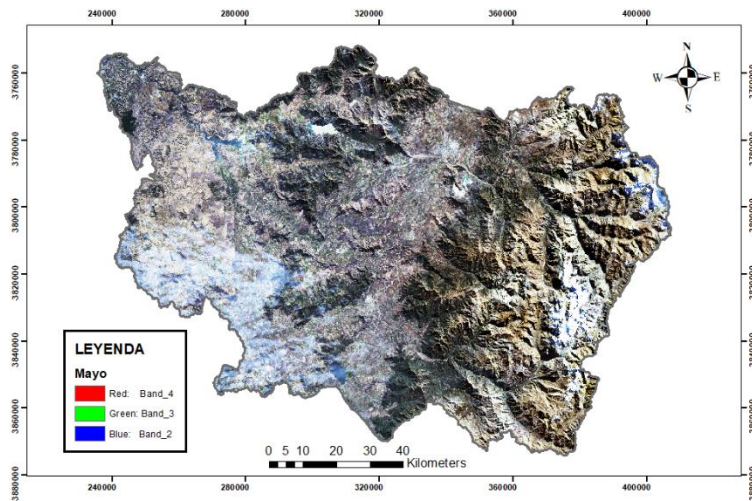
la Figura 35 y gracias a estas imágenes se logró la construcción de un NDVI promedio para los cuatro meses estudiados, obteniéndose una representación de la vegetación invernal de la cuenca, que se muestra en la Figura 36.

En el estudio *Soil erosion risk: assessment in Europe* (der Knijff, Jones, y Montanarella 2000) , se utilizó un método basado en la toma de valores NDVI muestrales para las clases de suelo desnudo y de bosque, a continuación se le asignaron valores extremos de factor C, los cuales corresponde a 1 para suelo desnudo y 0 para suelo bien protegido. Finalmente se aplica un ajuste exponencial entre el factor C y los NDVI, obteniéndose la Ecuación 14.

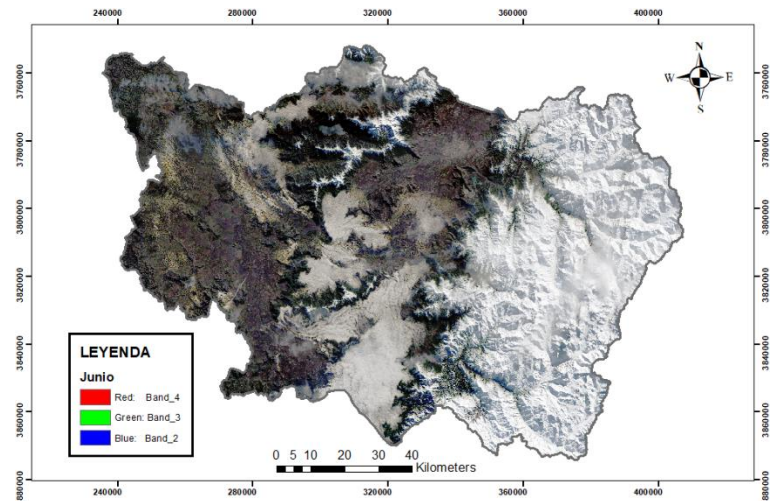
$$C = \exp\left(-\alpha \cdot \frac{NDVI}{(\beta - NDVI)}\right) \quad \text{Ecuación 14}$$

Siendo α y β parámetros que determinan la forma de la curva NDVI-C, los cuales toman valores de 2 y 1 respectivamente.

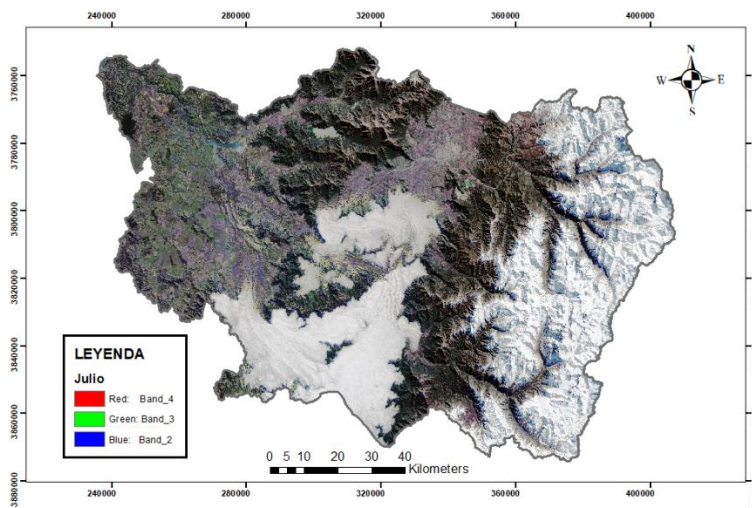
Finalmente, a partir de la Ecuación 14 y el NDVI invernal (Figura 36), se construyó un mapa de Factor C mediante el uso de la herramienta *Raster Calculator* del software ArcGIS.



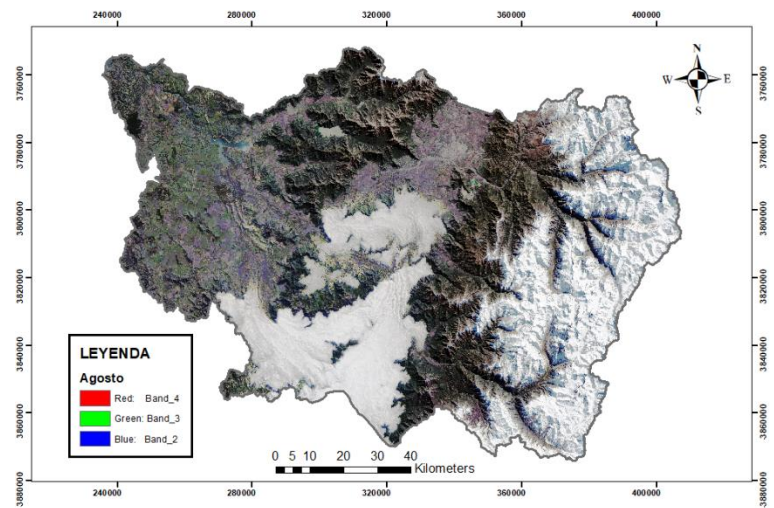
Mayo



Junio

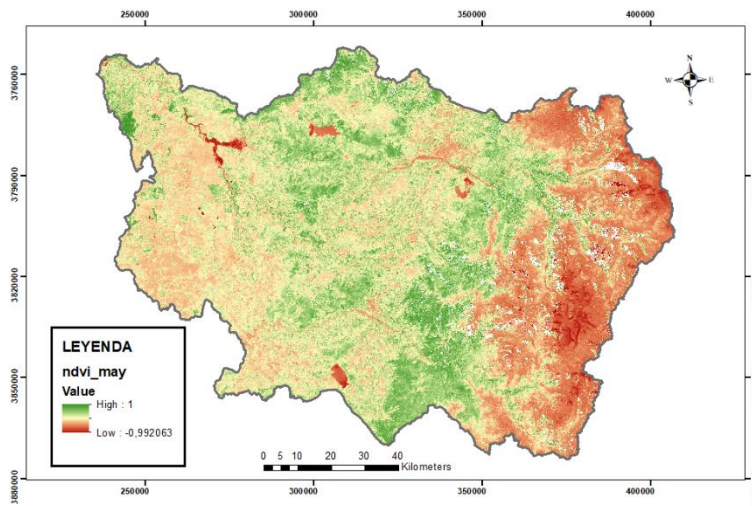


Julio

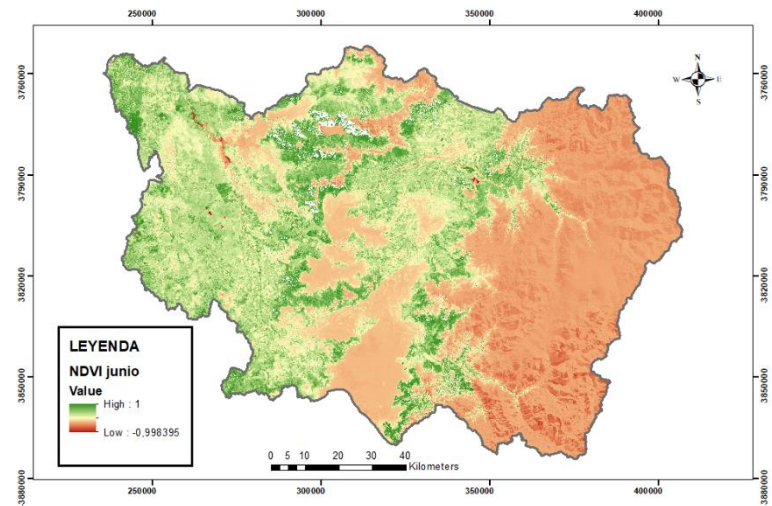


Agosto

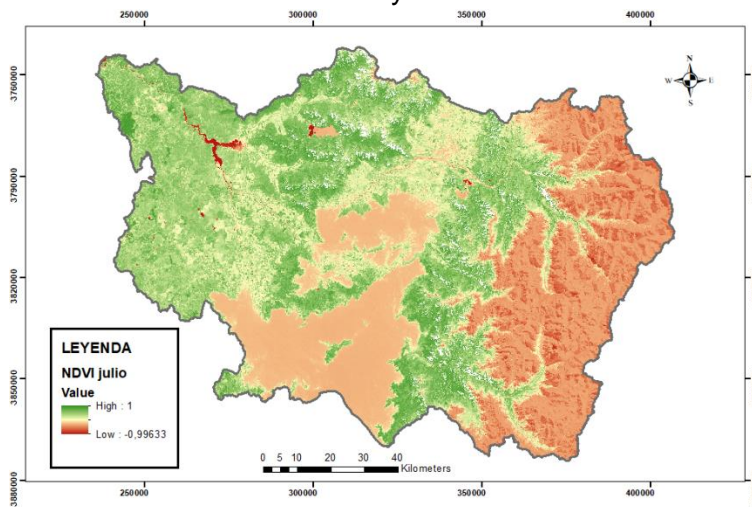
Figura 34 Imágenes RGB Landsat 8 de la cuenca de Rapel. Meses Mayo, Junio, Julio y Agosto



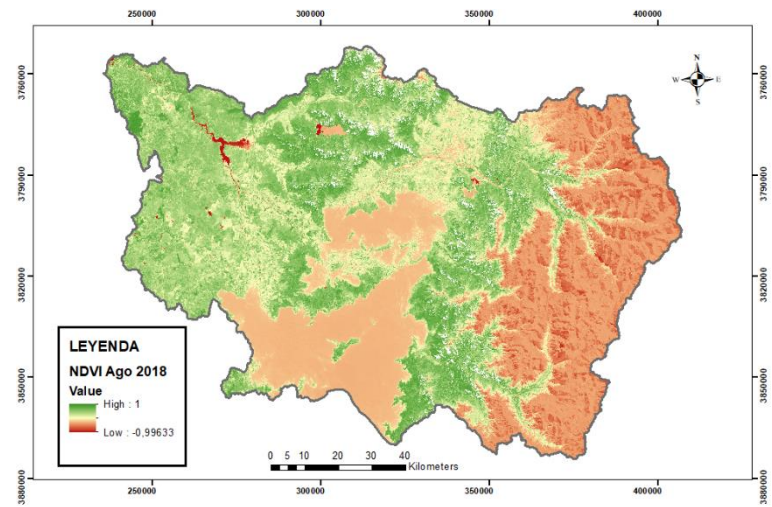
Mayo



Junio



Julio



Agosto

Figura 35 Imágenes NDVI de la cuenca de Rapel para los meses Mayo, Junio, Julio y Agosto

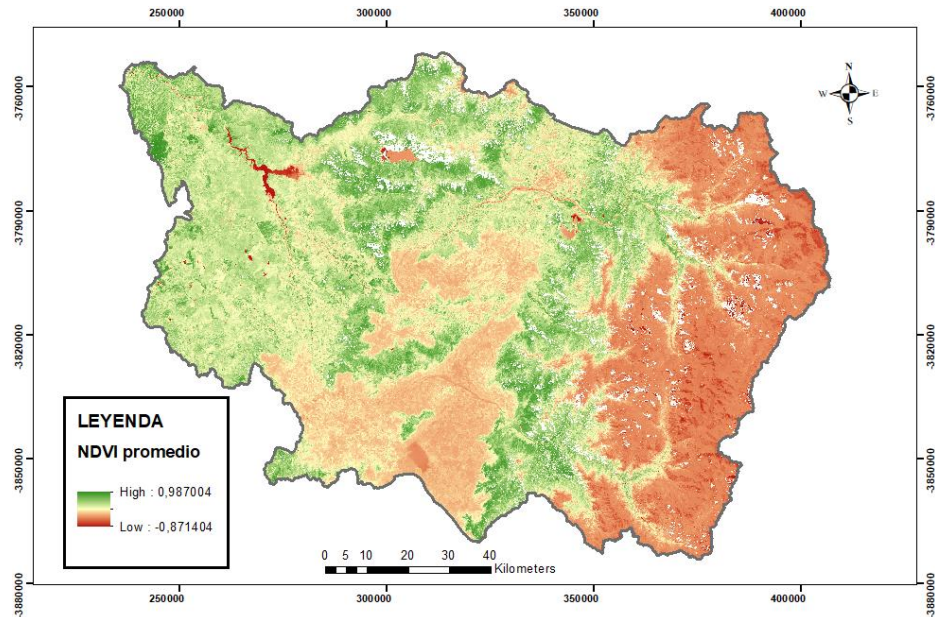


Figura 36 Imagen NDVI Invernal de la cuenca de Rapel

5.3 Análisis de las variaciones del factor C

La erosión hídrica se puede considerar como un fenómeno que influye sobre la composición de la vegetación y su patrón espacial al producir el desarraigo de plantas, el arrastre de semillas y modificar las propiedades del suelo.

Con la agudización de los procesos de erosión, la cobertura vegetal y la diversidad disminuyen, favoreciendo aún más la erosión de suelo debido a la pérdida de la protección que juegan la vegetación.

La modelación de la erosión hídrica por medio de la USLE, considera el efecto de la vegetación como un factor de protección del suelo, lo cual es debido al impedimento que juegan las raíces y dosel arbóreo frente a la disgregación de agregados estructurales. El efecto de impedimento a la erosión hídrica que genera la cubierta vegetal, fue calculado por medio de la Ecuación 14 y se obtuvo el mapa de la Figura 37.

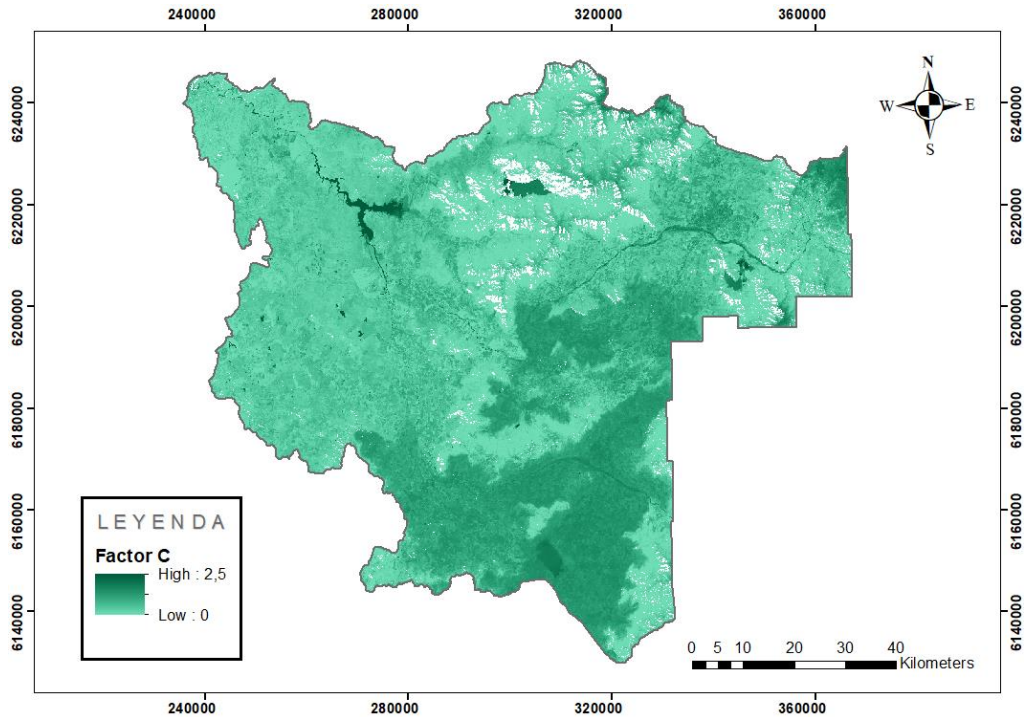


Figura 37 Mapa factor C. Influencia de la cubierta vegetal en la erosión a escala cuenca

A partir de la Ecuación 14, se puede desprender que para valores NDVI menores que cero, el exponente de la exponencial es negativo, obteniendo valores de C mayores que 1. Aplicando una lógica similar, para valores NDVI semejantes a cero y mayores que cero, se obtienen valores para e, factor C cercanos a 1 y menores a 1, respectivamente.

Cabe señalar que el NDVI estudiado en este trabajo, corresponde a la vegetación que se presenta en los meses lluviosos, temporada en que ocurren los fenómenos erosivos hídricos de las precipitaciones

5.3.1 Análisis cubierta vegetal a nivel de cuenca

Cuerpos de Agua en cuenca de Rapel

Valores C mayores a 1, son producto de un NDVI menor que cero, lo cual esta correlacionado a una mayor absorción de radiación infrarroja y a una mayor reflexión de radiación roja visible. Al observar este comportamiento, es posible asociarlo a la presencia de agua, ya sea por cuerpos de agua superficiales tales como lagos, ríos y

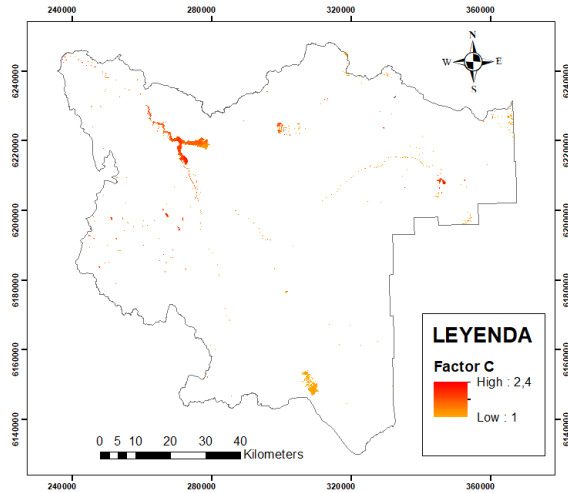


Figura 38 Cuerpos de Agua en cuenca de Rapel

esteros, además de nubes y nieve. En la Figura 38 es posible observar cuerpos de agua tales como el embalse Rapel, los Ríos Cachapoal y Tinguiririca, y el embalse de Convento viejo ubicado en la comuna de Chimbarongo, entre otros.

Terrenos desnudos de vegetación cuenca de Rapel

Valores C cercanos a 1, dan cuenta de un NDVI cercano a cero, lo cual es debido a un albedo similar de Infrarrojo y de Visible rojo. Este comportamiento es posible asociado a rocas y arena, por lo cual la Figura 39 muestra aquellos terrenos desnudos de vegetación.

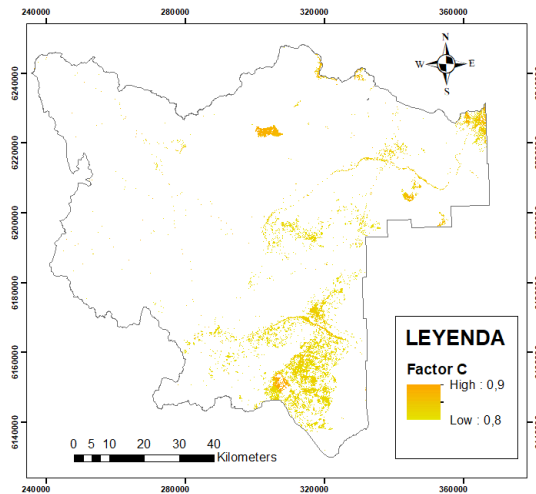


Figura 39 Terrenos desnudos de vegetación cuenca de Rapel

Debido a la fecha de las capturas, el valle central de la cuenca de Rapel se encuentra en pausa agrícola de invierno, por lo cual la Figura

39 da cuenta de un suelo desnudo post cosecha, o bien, cultivos de árboles frutales sin dosel alboreo.

Terrenos con arbustos y prados en la cuenca de Rapel

Valores moderados de C, da cuenta de un NDVI mayor que cero pero no cercano a 1, lo cual es debido a una reflectancia mayor de infrarrojo que de rojo visible. Este comportamiento es posible asociarlo a la presencia de terrenos con arbustos y prados, debido a que ocurre una mayor pero no completa absorción de rojo visible en la zona, lo cual es producto de una cobertura parcial

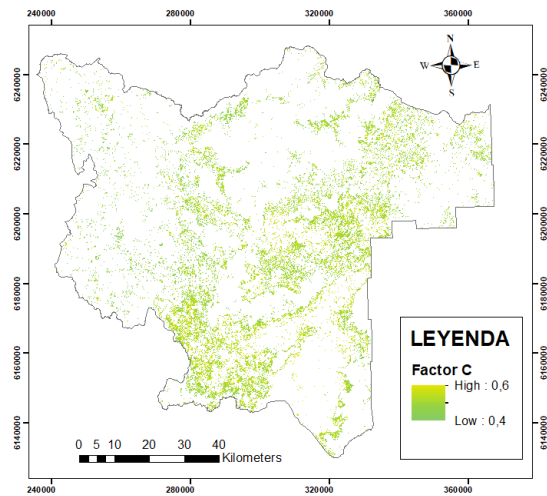


Figura 40 Terrenos con arbustos y prados en la cuenca de Rapel

del suelo. La Figura 40 muestra aquellas zonas en las cuales el suelo es protegido por vegetación pionera sobre rocas, o bien matorrales esclerófilos aislados.

Terrenos con espesa vegetación en la cuenca de Rapel

La presencia de bajos valores de C, da cuenta de NDVI muy cercano a 1, lo cual se debe a una completa absorción de rojo visible y una muy alta reflectividad de Infrarrojo. Este tipo de comportamiento es posible asociarlo a zonas con espesa vegetación, especialmente bosques y zonas de cultivos.

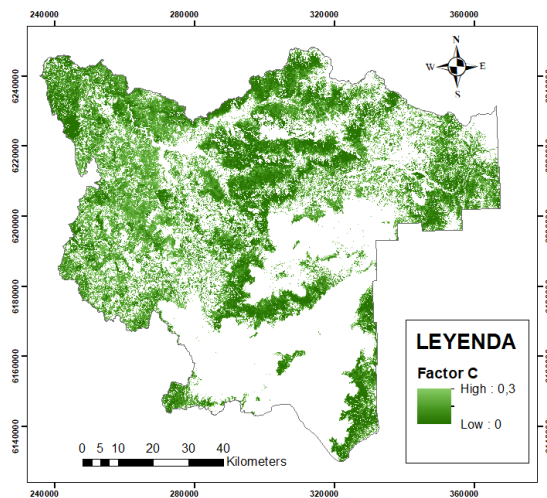


Figura 41 Terrenos con espesa vegetación en la cuenca de Rapel

La Figura 41 muestra las principales zonas con cubierta vegetal, las cuales corresponde a Altos de Cantillana ubicados en Alhué, a la agricultura de cereales y a cultivo de forestales.

5.3.2 Análisis cubierta vegetal a nivel comunal

La Figura 42 muestra la variación del factor de protección vegetal por comunas en la cuenca de Rapel. En ésta se puede observar que la máxima protección se presenta en las comunas de Santo Domingo y Navidad, lo cual esta correlacionado con plantaciones forestales de eucaliptus y pino.

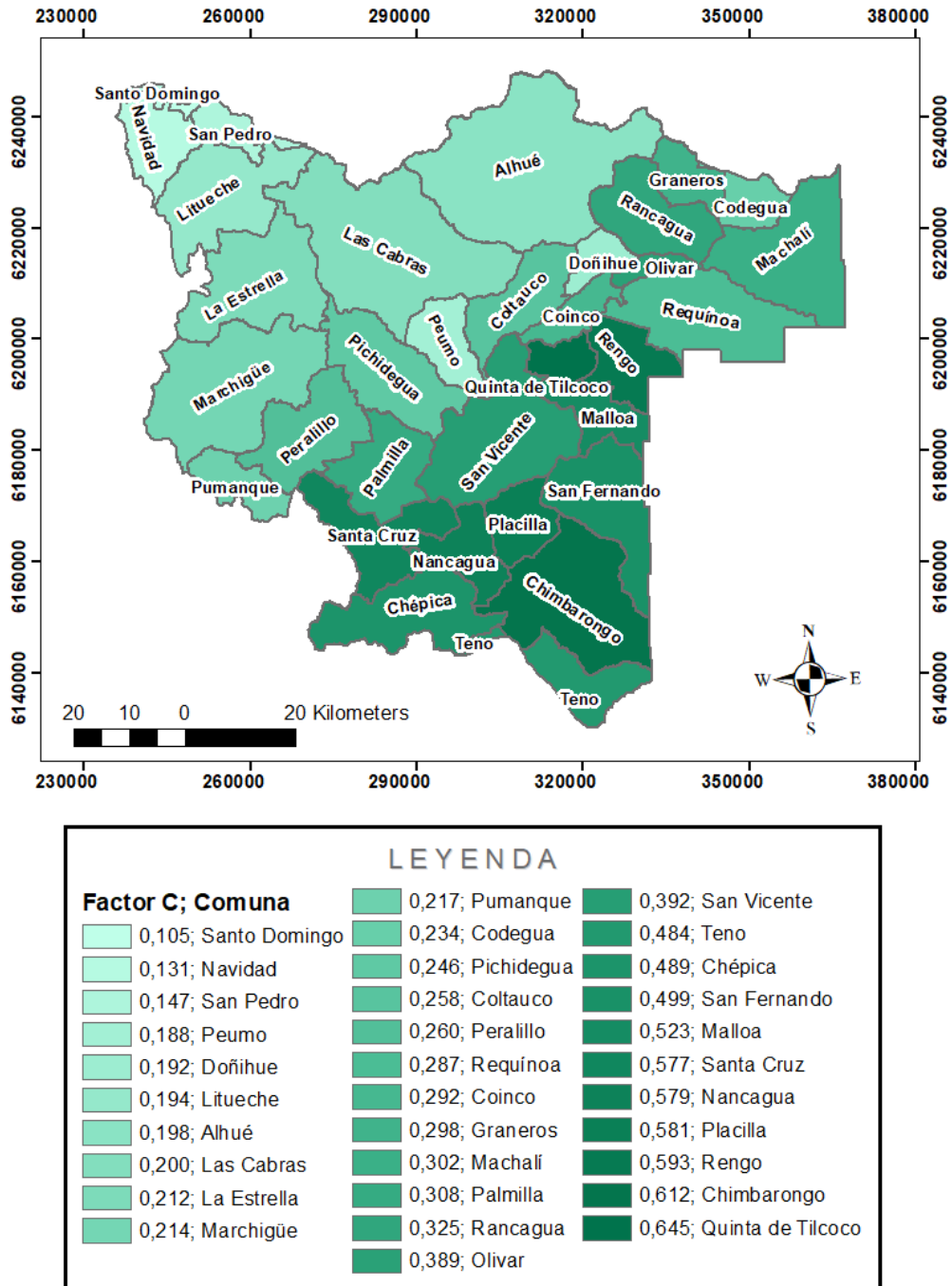


Figura 42 Mapa factor C. Influencia de la cubierta vegetal en la erosión a nivel comunas

Las comunas de Quinta de Tilcoco y Chimbarongo, presentan los mayores valores del factor C, lo cual implicaría en una baja resistencia a la erosión debido a la falta de protección por parte de la cubierta vegetal producto de la ausencia de la misma.

La comuna de Quintal de Tilcoco exhibe una nula presencia de bosques espesos o zonas de cultivos, y una alta superficie de cultivos con receso invernal, pastizales y matorrales, lo cual da cuenta de un valor alto de factor C.

A pesar de la existencia de bosques espesos en la comuna de Chimbarongo, la presencia del embalse de convento viejo junto a la pausa agrícola de invierno, da cuenta de un valor promedio alto del factor C en la comuna.

VI. FACTOR P. PRACTICAS DE CONSERVACION DE SUELO

El valor del factor P para un determinado tipo de práctica de conservación, expresa la relación entre la cantidad de suelo perdido utilizando la práctica de conservación que se aborda, y la que perdería labrando según la máxima pendiente. Este factor recoge la influencia que tienen las prácticas de conservación de suelo sobre las tasas de erosión de una parcela, disponiendo la vegetación siguiendo curvas de nivel, en fajas o en terrazas para cortar líneas de escorrentía.

Los valores de P varían de 0 a 1, en donde el valor 0 representa una muy buena resistencia a la erosión debido a la práctica usada y el valor 1 refleja la inexistencia de una medida de conservación.

Experimentalmente se ha determinado los valores del factor P para distintas prácticas de conservación (Wischmeier, Smith, y Col 1978), pero el presente trabajo solo se enfocará en el estudio de la erosión hídrica por medio el uso de *curvas de nivel*, debido a que esta corresponde a la medida de menor costo de aplicación y la más frecuentemente usada en Chile.

6.1 Método de Calculo

La máxima pendiente de cultivo es un tema de suma importancia al momento de evitar el avance de la erosión del suelo, es por ello que la FAO estableció los índices de protección del suelo. En esto se indica que pendientes menores a 12%, corresponderán a pendientes de iniciación de erosión, y que inclinaciones entre 18 y 25% darán cuenta al comienzo del fenómeno de arrastre de suelo, por lo cual se establece a la pendiente máxima de cultivo a los 25% (MAPAMA 2008).

La Tabla 13 se muestra los valores del factor P para la práctica de conservación de curvas de nivel, según pendiente y longitud de la pendiente de acuerdo con lo establecido en el manual USLE

La modelación de la práctica de curvas de nivel se realiza mediante el uso del DEM de resolución de 30m que se muestra en la Figura 27, con esta imagen se definió la pendiente y la máxima longitud

Tabla 13 Factor P para practica de conservación de curvas de nivel

Pendiente (%)	Máxima longitud (m)	Factor P
1-2	120	0,60
3-5	90	0,50
6-8	60	0,50
9-12	35	0,60
13-16	25	0,70
17-20	20	0,80
21-25	15	0,90

La pendiente en porcentaje se obtuvo a partir de la herramienta *slope* del software ArcGis.

La Figura 43 ejemplifica el razonamiento para el cálculo de la pendiente.

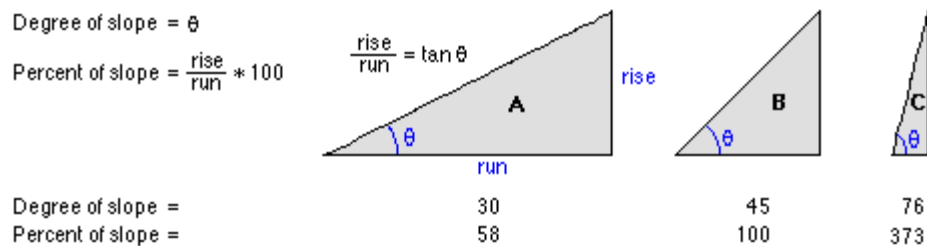


Figura 43 Relación pendiente en grados y porcentaje

La máxima longitud, se definió por medio de la ecuación sugerida por para calcular el factor LS (Ecuación 11) (Moore y Wilson 1992), salvo que solo fue empleada aquella parte relacionada con la longitud de la ladera, tal como muestra la Ecuación 15.

$$MaximaLongitud = \left(\frac{A_s}{22,13} \right)^{0,6} \quad Ecuación 15$$

A_s corresponde a la acumulación de flujo (obtenida mediante el software ArcGIS), 0,6 a un factor de flujo de arroyo y 22,13 un valor estándar indicado por el manual USLE (Wischmeier, Smith, y Otros 1978)

6.2 Análisis de la distribución del factor P

El objetivo de la práctica de conservación recae en la disminución la erosión del suelo por medio del corte de las líneas de escorrentía; pero tal como se observó previamente, las prácticas de conservación no pueden ser aplicadas a todas las pendientes, debido a que inclinaciones mayores a 25% dan pie a inminentes fenómenos de arrastre de suelo, junto con ser la máxima pendiente de cultivo.

A continuación se analizan los resultados a nivel de cuenca y a nivel comunal del factor P para la práctica de Curvas de nivel; cabe señalar que cuanto más alto sea el valor de la práctica de conservación ($P \approx 1$) menor será la eficacia de la medida

6.2.1 Análisis factor practica de conservación escala cuenca

La Figura 44 da cuenta de la distribución del factor P en la cuenca de Rapel, señalando con colores a todas aquellas zonas en el mapa en los cuales se pueden aplicar la medida de conservación curvas de nivel. Por otra parte, todas aquellas zonas blancas, corresponden a sectores de cuerpos de agua, montañas, y zonas escapadas con pendientes en que el suelo será gravemente erosionado al ser cultivado.

La Tabla 14 muestra un resumen en porcentaje sobre la presencia dentro del área de estudio de los 5 tipos de valores que puede tomar el factor P.

Tabla 14 Presencia en porcentaje del valor P en la cuenca de Rapel

Valor P	Presencia (%)
0,5	38
0,6	27
0,7	15
0,8	11
0,9	9

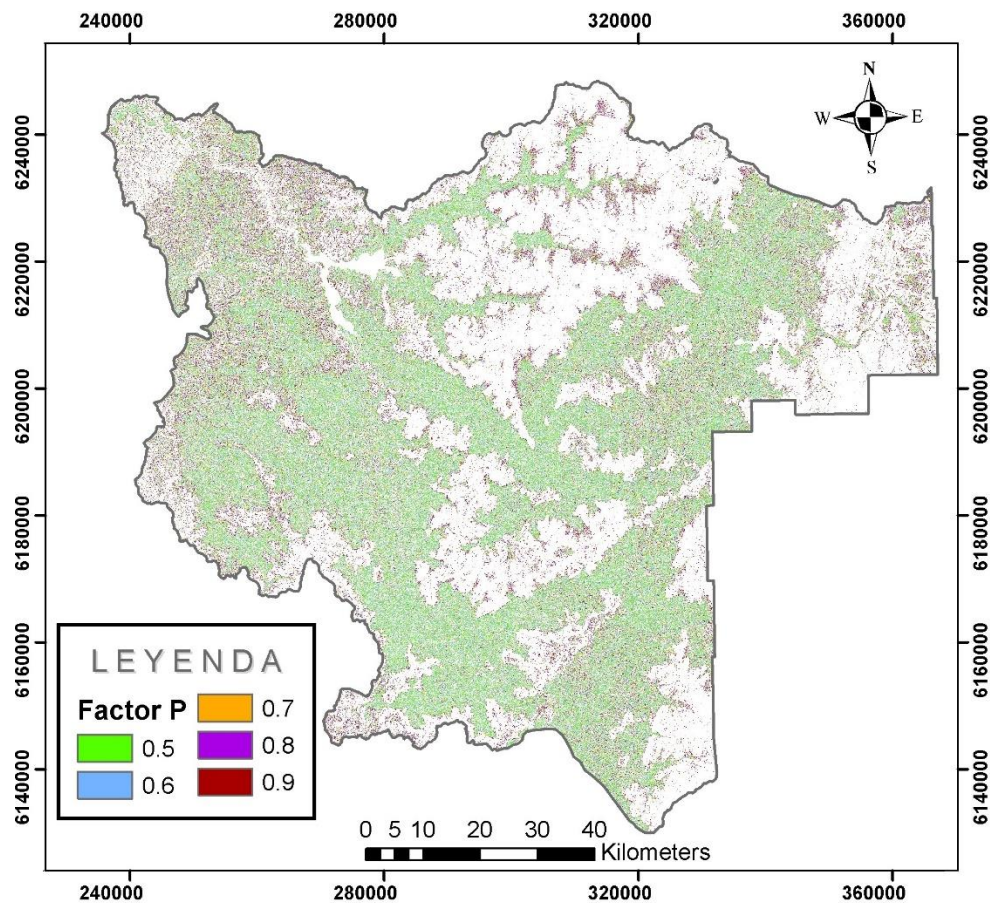


Figura 44 Mapa factor P. Influencia de la práctica de conservación en la pérdida de suelo a escala cuenca

A partir de Figura 44 y la Tabla 14, se puede observar que al aplicar la medida de cultivo en contorno, para el 38% de las zonas (color verde) la erosión de los suelos sería reducida en la mitad, lo cual da cuenta de una alta efectividad de la práctica de conservación.

El 27% de los suelos señalados en Figura 44 (color celeste), presentan un valor P de 0,6 , el cual representa una importante disminución del fenómeno de arrastre de suelo para una gran área de la cuenca.

El 15% de suelos, señalados de color Ocre en la Figura 44, muestran que la práctica generaría una moderada protección contra el arrastre de suelos en la cuenca de Rapel.

El 11% y 9% de los suelos, señalados en la Figura 44 como las zonas violeta y café respectivamente, dan cuenta de una baja protección por la medida de cultivo en contorno, lo cual se debe principalmente a que estas zonas presentan la pendiente límite para el inminente arrastre de suelo.

Es importante dar cuenta que la medida de cultivo en contorno, representaría una importante y moderada protección contra la pérdida de suelo para cerca del 80% de los suelos cultivables de la cuenca de Rapel, por lo cual la aplicación de esta práctica debería ser fomentada debido a su bajo costo y alto beneficio.

6.2.2 Análisis factor practica de conservación escala comunal

La Figura 45 muestra la variación de los promedios comunales del Factor P, en la cual podemos observar que los valores extremos para la práctica de cultivo en contorno, corresponden a Olivar y Machalí, con índices de 0,58 y 0,70 respectivamente.

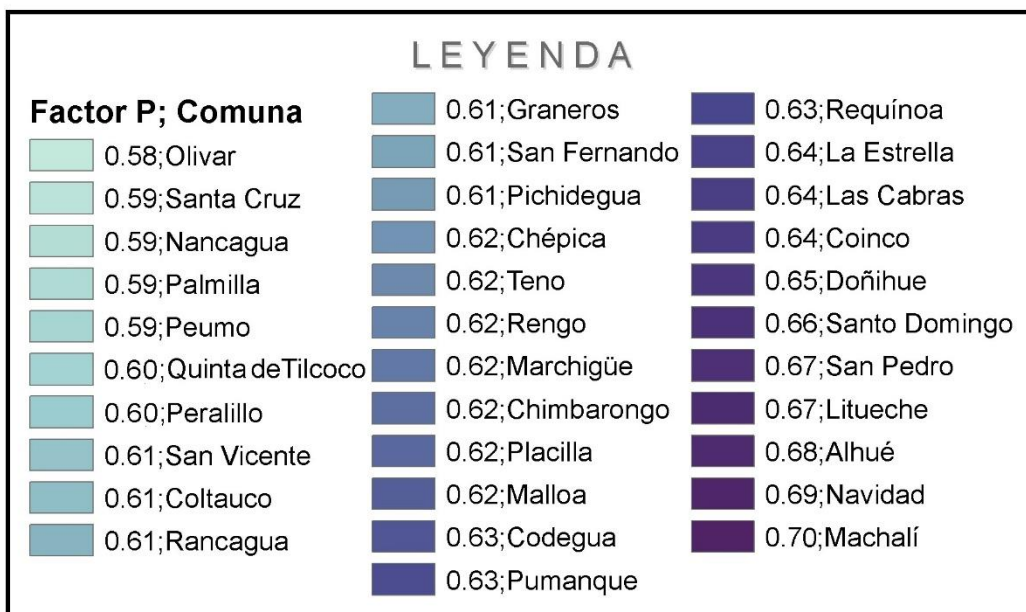
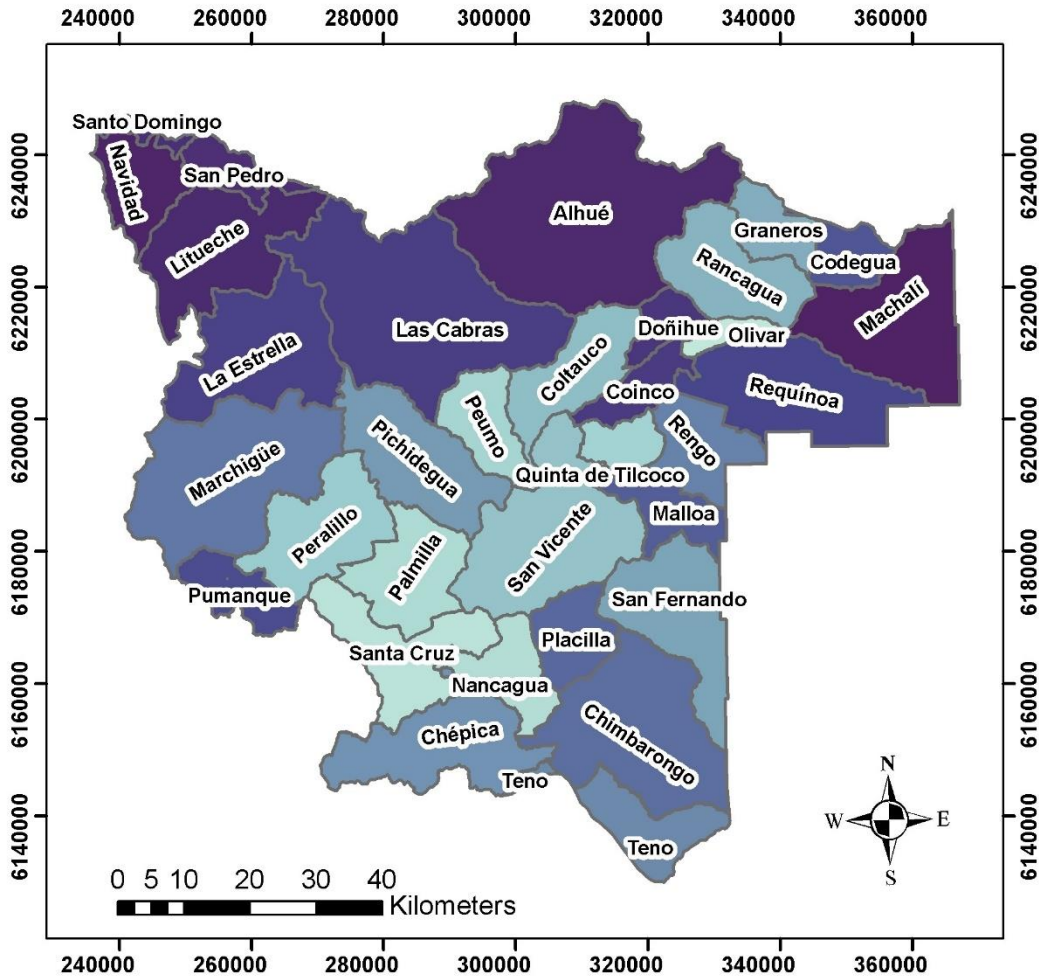


Figura 45 Mapa factor P. Influencia de la práctica de conservación en la pérdida de suelo a escala comunal

6.2.2.1 Mínimo comunal, Olivar.

La comuna de Olivar presenta el menor valor promedio para la práctica de conservación (Factor P= 0,58), lo cual es reflejo de la gran superficie comunal en la que la práctica de curvas de nivel juega un importante grado de protección.

La Tabla 15 indica la presencia en % de cada valor del Factor P en la comuna de Olivar, dando cuenta que cerca del 90% de las zonas presentan un grado importante protección, mientras que solo cerca del 10% de la superficie en la que se puede aplicar la medida, no se vería favorecida considerablemente por la misma.

Tabla 15 Presencia en porcentaje del valor P en la comuna de Olivar

Valor P	Presencia (%)
0,5	50
0,6	31
0,7	11
0,8	5
0,9	2

La Figura 46 muestra el histograma de dispersión de pendientes en la comuna de Olivar, en el cual se puede observar un sesgo hacia la derecha y valores atípicos sobre los 25%, indicándonos que la mayoría de las pendientes a nivel comunal se encuentra bajo el 25%, por lo que casi la totalidad de la superficie de Olivar estaría bajo la pendiente máxima de cultivo señalada por la FAO (MAPAMA 2008).

6.2.2.2 Máximo comunal, Machalí

La comuna de Machalí presenta el mayor valor promedio para la práctica de conservación (Factor P= 0,70), lo cual la señalaría como la comuna menos apropiada para emplear la práctica de curvas de nivel. Al observar la Tabla 16, la cual indica la presencia en porcentajes de cada valor del Factor P en la comuna, se observa una distribución homogénea entre los grados de protección, por lo cual un valor promedio de 0,7 es esperable.

Tabla 16 Presencia en porcentaje del valor P en la comuna de Machalí

Valor P	Presencia (%)
0,5	21
0,6	21
0,7	19
0,8	20
0,9	20

La Figura 47 muestra el histograma de dispersión de pendientes en la comuna de Machalí, en el cual se puede observar un ligero sesgo a la derecha y valores atípicos sobre los 103%. De este gráfico podemos desprender que solo cerca del 20% del total de pendientes de la comuna, estarían bajo la pendiente máxima de cultivo señalada por la FAO (25%), dando cuenta que solo una baja superficie de cultivo no presentaría riesgo inminente de arrastre de suelo.

Es crucial dar cuenta que, debido a la baja superficie cultivable de esta comuna, la aplicación de la práctica de conservación es fundamental, ya que debido a características propias de la zona, el suelo como recurso natural de la comuna presenta una importante vulnerabilidad.

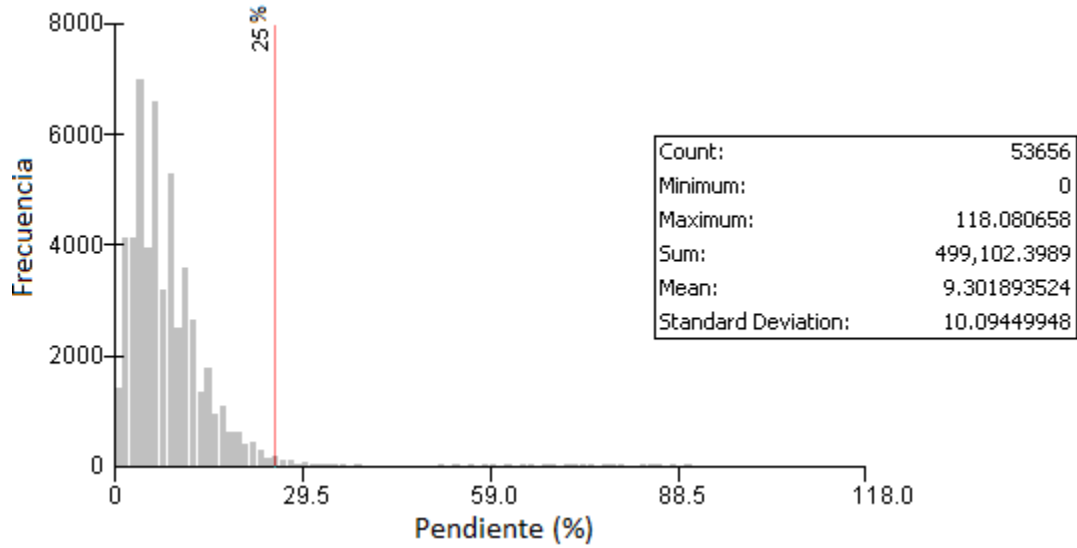


Figura 46 Histograma de pendientes en porcentaje para la comuna de Olivar

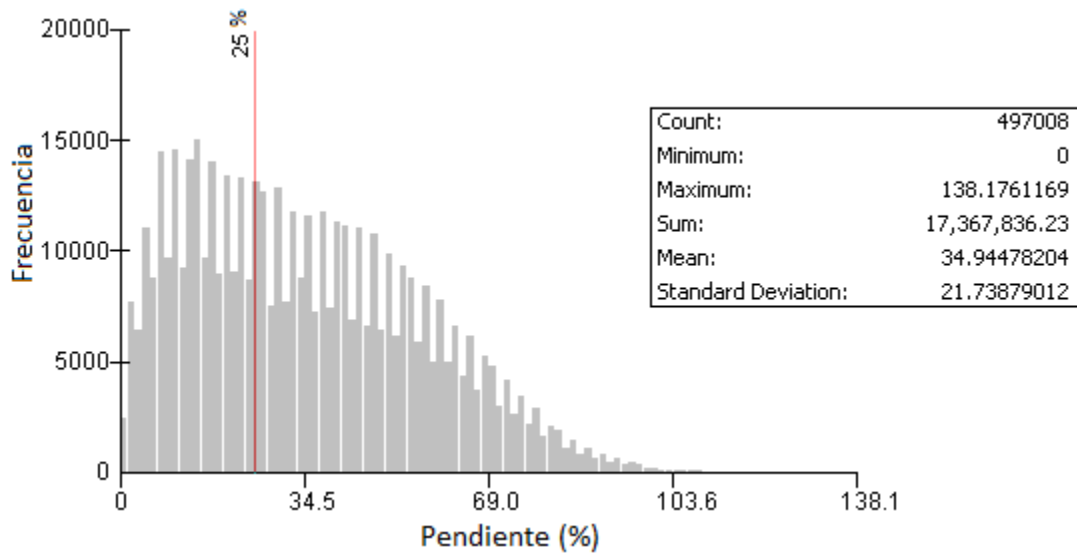


Figura 47 Histograma de pendientes en porcentaje para la comuna de Machalí

VII. PERDIDA DE SUELO DEBIDO A LA EROSIVIDAD DE LA PRECIPITACION EN ZONAS CULTIVABLES.

Hasta el momento se han analizado en detalle cada uno de los factores que influyen en el modelo de perdida de suelo descrito por USLE; pero finalmente es posible desarrollar un análisis holístico sobre cómo se presenta la perdida de suelo debido a la erosividad de la precipitación en la cuenca de Rapel.

Al igual que en secciones anteriores, los resultados serán evaluados a escala cuenca y a escala comunal, junto con el desarrollo de un análisis comparativo sobre la utilidad de la práctica de curvas de nivel para la conservación del recurso suelo.

7.1 Razón de perdida de suelo a escala de cuenca de Rapel

7.1.1 Razón perdida de suelo sin practica de conservación

Para estimar la perdida de suelo sin practica de conservación (Figura 48), solo basta prescindir del mapa modelado para el factor P (Figura 44) al momento de realizar el producto simple de los factores (R, K, LS y C), y acotar el área de estudio a una pendiente máxima de 25%.

La Figura 48 muestra como varia la perdida de suelo en la cuenca de Rapel, alcanzando en las zonas más afectadas valores cercanos a los $1.600 \left(\frac{Mg}{ha \cdot año} \right)$; pero en su mayoría, se presentan zonas celestes y verdes de baja, moderada o alta erosión hídrica, por lo cual valores tan altos o muy severos de perdida de suelo son atípicos.

Las zonas de coloración negra de la Figura 48 ,corresponde a sectores en los cuales la agricultura no puede desarrollarse, ya sea porque son pendientes muy escarpadas, cimas de cerros y montañas, o bien cuerpos de agua tales como embales y ríos.

Al estudiar los puntos de coloración amarillo o naranja de la Figura 48, es posible identificar aquellas zonas que presentan los mayores valores de pérdida de suelo, las cuales en su mayoría se encuentran bordeando alguna zona de geografía montañosa, tal como se observa en los altos de Cantillana ubicados al Norte de la cuenca de Rapel o bien las zonas de la Cordillera de los Andes ubicadas hacia el Este del mapa.

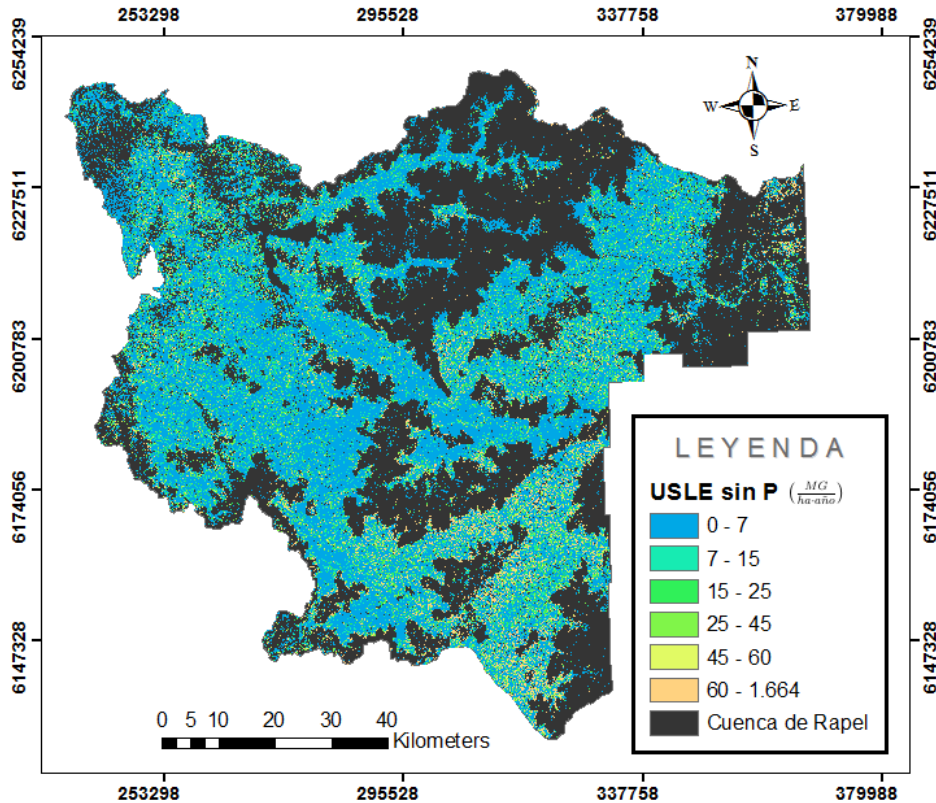


Figura 48 Mapa de erosión de la cuenca de Rapel sin práctica de conservación

A partir de la información desprendida de la Figura 48, es posible inferir que la pérdida de suelo se ve agravada a medida que aumenta la pendiente de la ladera, y que valores muy severos de pérdida de suelo como los señalados en el mapa, deben ser considerados como zonas formadoras de suelos más que potenciales sectores de actividad agrícola, por lo cual cualquier actividad antrópica que precise del uso del suelo debería ser restringida. Otras zonas que presentan altos valores de pérdida de suelo, es el sector sur de la cuenca, lo cual está relacionado con la pausa agrícola de invierno.

Al oeste de la cuenca de Rapel, se encuentran en su gran mayoría zonas donde predominan los suelos Alfisoles (Figura 11) de alto grado de erodabilidad debido a la gran concentración de arcillas, además estos sectores presentan altos valores LS (Figura 29) producto de la cordillera de la costa. Al observar la Figura 48 se encuentra que los sectores celestes se ubican en su gran mayoría hacia el Oeste de la cuenca de Rapel, lo cual se contradeciría a lo previamente mencionado; este fenómeno de baja pérdida de suelo a pesar de lo poco favorable de las condiciones, se correlaciona directamente con la cubierta vegetal, ya que estas zonas presentan alta agricultura de cereales y cultivos forestales durante los meses en que las precipitaciones generan los mayores fenómenos erosivos.

El área de estudio de la cuenca de Rapel (Figura 7), alcanza una superficie de 8.788 Km², de los cuales solo 4.534 Km² serían utilizable para cultivo (cerca del 52% de la superficie estudiada) según lo modelado en la Figura 48.

La Tabla 17 resume los valores de pérdida de suelo a escala cuenca al no aplicar práctica de conservación. Cabe señalar que la comparación en porcentaje de la superficie que presenta un determinado rango de riesgo, es realizada de acuerdo al total de superficie cultivable y al total de la superficie estudiada de la cuenca de Rapel.

Tabla 17 Pérdida de suelo para la cuenca de Rapel sin uso de práctica de conservación

Rango de pérdida de suelo ($\frac{Mg}{ha \cdot año}$)	Riesgo	Área (Km ²)	% superficie en relación a	
			Suelo cultivable	Suelo cuenca
0-7	Bajo	3343	66,1	38,0
7-15	Moderado	345	9,8	3,9
15-25	Alto	260	7,5	3,0
25-45	Muy Alto	262,6	7,5	3,0
45-60	Severo	96	2,8	1,1
>60	Muy Severo	228	6,3	2,6

De la Tabla 17 se puede desprender que más de la mitad de la superficie cultivable (66%) presentaría un *riesgo bajo* de erosión, lo cual es muy favorable para el desarrollo de la actividad agrícola y el cuidado del recurso suelo.

Cerca del 10% de la superficie cultivable presentaría un *riesgo moderado* frente a la erosión, indicando que estas zonas ya requerirían un manejo de cultivo para la protección del suelo.

La Tabla 17 también indica que cerca del 18% del suelo cultivable se encontraría en el rango de *alto*, *muy alto* y *severo* de pérdida de suelo, marcando de este modo la urgencia de un manejo que este enfocado en la protección del recurso.

El 6,3% de la superficie cultivable presentaría un riesgo *Muy Severo* a la pérdida de suelo. Estas zonas a pesar de sumar cerca de 228 Km² debería ser estudiada la posibilidad de considerarlas únicamente como sectores formadores de suelo.

La Figura 49 corresponde al histograma de valores del mapa modelado de pérdida de suelo en el escenario de no uso de prácticas de conservación (Figura 48). El conjunto de datos presenta un sesgo hacia la derecha y valores atípicos sobre los $100 \left(\frac{Mg}{ha \cdot año} \right)$; la mayoría de estos se encuentran bajo el rango de erosión *Muy severa*, y el promedio de los mismos corresponde a $14 \left(\frac{Mg}{ha \cdot año} \right)$, indicando un rango promedio de *Riesgo Moderado* para la cuenca de Rapel.

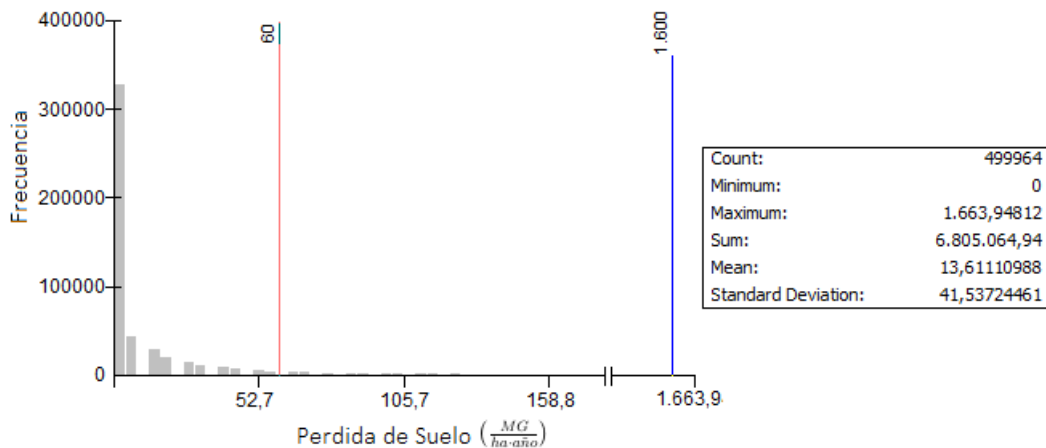


Figura 49 Histograma de pérdida de la cuenca de Rapel sin practica de conservación

7.1.2 Razón de pérdida de suelo con practica de conservación

Para estimar la erosión hídrica con practica de conservación, basta con realizar un producto simple de cada uno de los factores previamente estudiados (R, K, LS, C y P). A partir de este método se obtiene el mapa de pérdida de suelo en escenario de uso de practica de conservación (Figura 50).

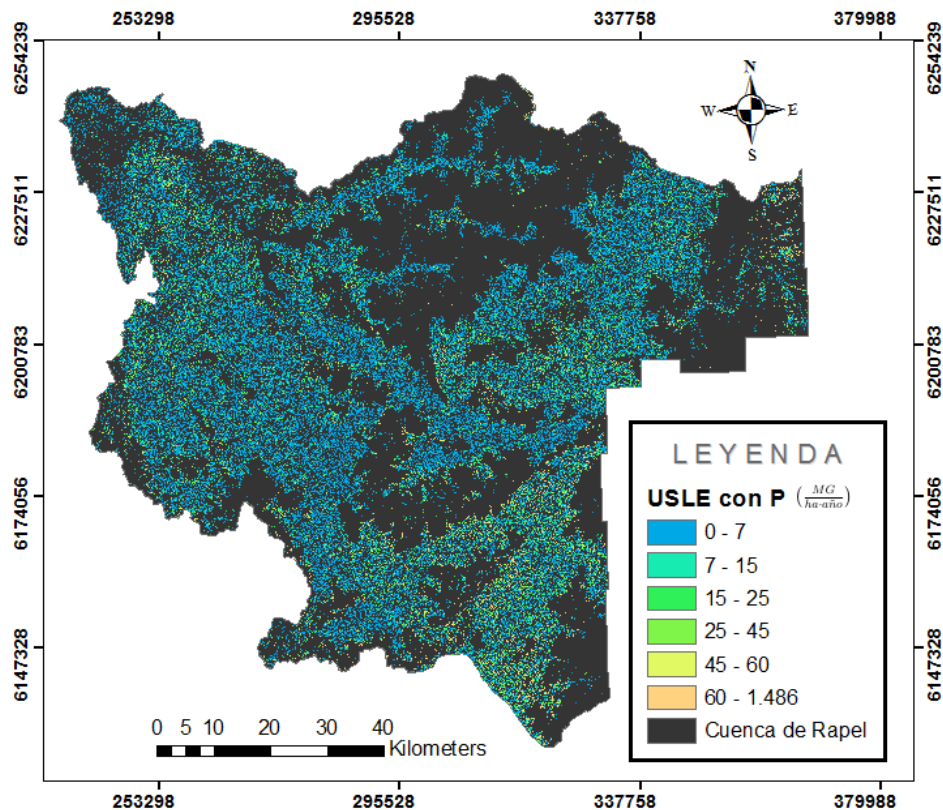


Figura 50 Mapa de pérdida de suelo de la cuenca de Rapel con practica de conservación

La Figura 50 muestra como varia la pérdida de suelo en la cuenca de Rapel al aplicar la práctica de conservación curvas de nivel, alcanzando en las zonas más afectadas valores cercanos a los $1400 \left(\frac{Mg}{ha \cdot año} \right)$ pero presentando en su mayoría zonas celestes y verdes de baja o moderada pérdida de suelo, por lo cual valores tan altos o muy severos son atípicos.

Al igual a lo analizado previamente (sección 7.1.1), las zonas de coloración negra del mapa de la Figura 50, corresponden a sectores en los cuales la agricultura no puede desarrollarse, además se puede observar que las zonas con mayores valores de pérdida de suelo se

encuentran bordeando algún sector de geografía montañosa o bien corresponden a sectores en pausa agrícola de invierno.

El área de estudio de la cuenca de Rapel (Figura 7), alcanza una superficie de 8.788 Km², de los cuales solo 1.860 Km² serían utilizables para cultivo (cerca del 21% de la superficie de la cuenca) según lo modelado en la Figura 50.

Tabla 18 Perdida de suelo para la cuenca de Rapel con uso de practica de conservación

Rango de pérdida de suelo ($\frac{Mg}{ha \cdot año}$)	Riesgo	Área (Km ²)	% superficie en relación a	
			Suelo cultivable	Suelo cuenca
0-7	Bajo	1320	95,3	15,0
7-15	Moderado	202	1,8	2,3
15-25	Alto	124	1,1	1,4
25-45	Muy Alto	107	0,9	1,2
45-60	Severo	36	0,3	0,4
>60	Muy Severo	72	0,6	0,8

De la tabla anterior se puede desprender que tres cuartos de la superficie cultivable (95%) presentaría un riesgo *Bajo* de pérdida de suelo, lo cual es un escenario muy favorable para el desarrollo de la actividad agrícola y el cuidado del recurso suelo. El 2% de la superficie cultivable presentaría un riesgo *Moderado* frente a la erosión; el 2% el suelo cultivable se encontraría en el rango de *Alto*, *Muy alto* mientras que el 0,9% del suelo presentaría riesgos *Severo* y *Muy Severo*.

La Tabla 18 da cuenta de la eficacia en la protección del suelo de la practica curvas de nivel, al presentar el 97% de los datos en los dos niveles más bajo de riesgo de pérdida de suelo.

La Figura 51 corresponde al histograma de valores del mapa de la Figura 50; en esta se puede observar como la mayoría de los datos se encuentran bajo el rango de erosión *Muy severa*, y que el promedio de los mismos se encuentra en los 11 ($\frac{Mg}{ha \cdot año}$), indicando un rango de *Riesgo Moderado* para la cuenca con practica de conservación.

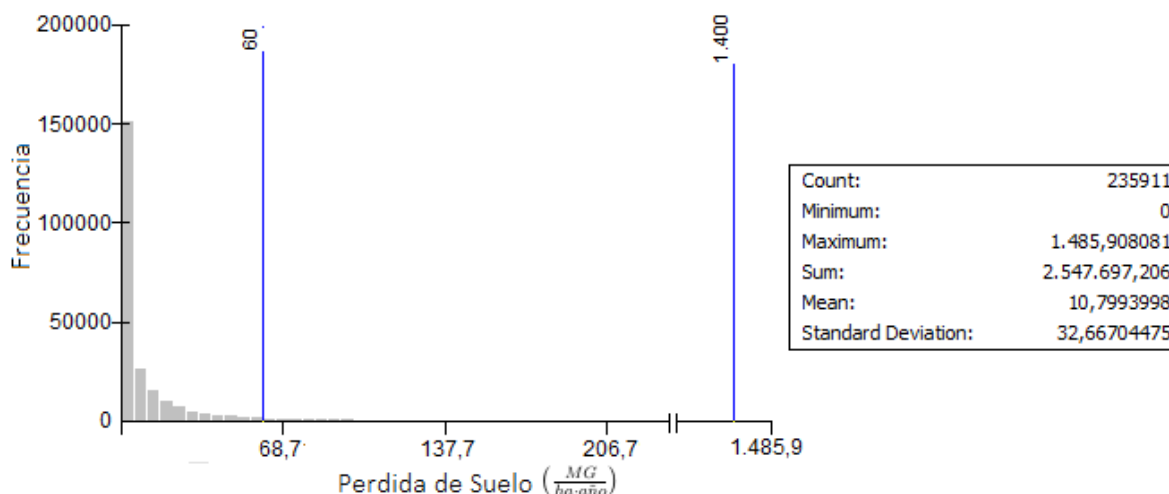


Figura 51 Histograma de pérdida de suelo de la cuenca de Rapel con práctica de conservación

7.1.3 Análisis comparativo del uso y no uso de la práctica de conservación

Curvas de nivel

La práctica de conservación de Curvas de nivel es un tipo de manejo de cultivo enfocado en cortar las líneas de escorrentía, lo cual dificulta el transporte de sedimentos por medio del agua y con ello retrasa los procesos de erosión hídrica. La Tabla 19 muestra comparativamente las superficies cultivables según riesgo o intervalo de pérdida de suelo, para los mapas modelados de razón de pérdida de suelo en escenarios de sin (Figura 48) y con (Figura 50) práctica de conservación.

Tabla 19 Comparación en rango de pérdida de suelo de la superficie cultivable según uso y no uso de la práctica de conservación Curvas de nivel en la cuenca de Rapel

Riesgo de pérdida de suelo		% de la superficie cultivable	
Riesgo	$\left(\frac{Mg}{ha \cdot año}\right)$	Sin Practica	Con Practica
0-7	Bajo	66,1	95,3
7-15	Moderado	9,8	1,8
15-25	Alto	7,5	1,1
25-45	Muy Alto	7,5	0,9
45-60	Severo	2,8	0,3
>60	Muy Severo	6,3	0,6

La Tabla 19 señala como la práctica de conservación de curvas de nivel favorece el aumento de la superficie cultivable en el rango de *riesgo Bajo*, mientras que aquellos rangos que representan un mayor riesgo de pérdida de suelo (Alto, Muy Alto, Severo y Muy severo) muestran una disminución en la superficie cultivable.

La práctica de conservación de Curvas de Nivel jugaría un gran rol en la protección del recurso suelo al disminuir la máxima tasa de erosión en la cuenca, al pasar de un máximo de 1600 a 1400 $\left(\frac{Mg}{ha \cdot año}\right)$ (Figura 48 y Figura 50), junto a aumentar el porcentaje de la superficie cultivable que se encuentra en el rango de riesgo Bajo, y disminuir en los rangos de mayor riesgo.

En promedio el uso de la práctica de conservación curvas de nivel, implicaría una disminución del 15% en la razón de pérdida de suelo de toda la cuenca.

7.2 Razón de pérdida de suelo a escala comunal

En la actualidad las decisiones locales son tomadas a escala comunal, por lo cual un análisis en este grado permitirá desarrollar una visión local del riesgo del recurso suelo, lo cual se traduce en el aumento del conocimiento técnico para la toma de decisiones de las comunas.

7.2.1 Razón de pérdida de suelo sin practica de conservación

Para estimar la erosión hídrica sin practica de conservación a escala comunal, se hizo uso de la herramienta *Zonal Statistic Table* (ZST) del software ArcGIS sobre la imagen modelada de pérdida de suelo sin practica de conservación (Figura 48).

La herramienta ZST se caracteriza por tomar un valor promedio de aquellos puntos que se encuentran dentro de un contorno definido, en este caso tal contorno fue establecido según los límites de cada comuna.

Por medio de este método se obtiene el mapa de pérdida de suelo que se muestra en la Figura 52, la cual señala a las comunas de Olivar y Teno como las que presentan la mínima y máxima tasa de pérdida de suelo, respectivamente.

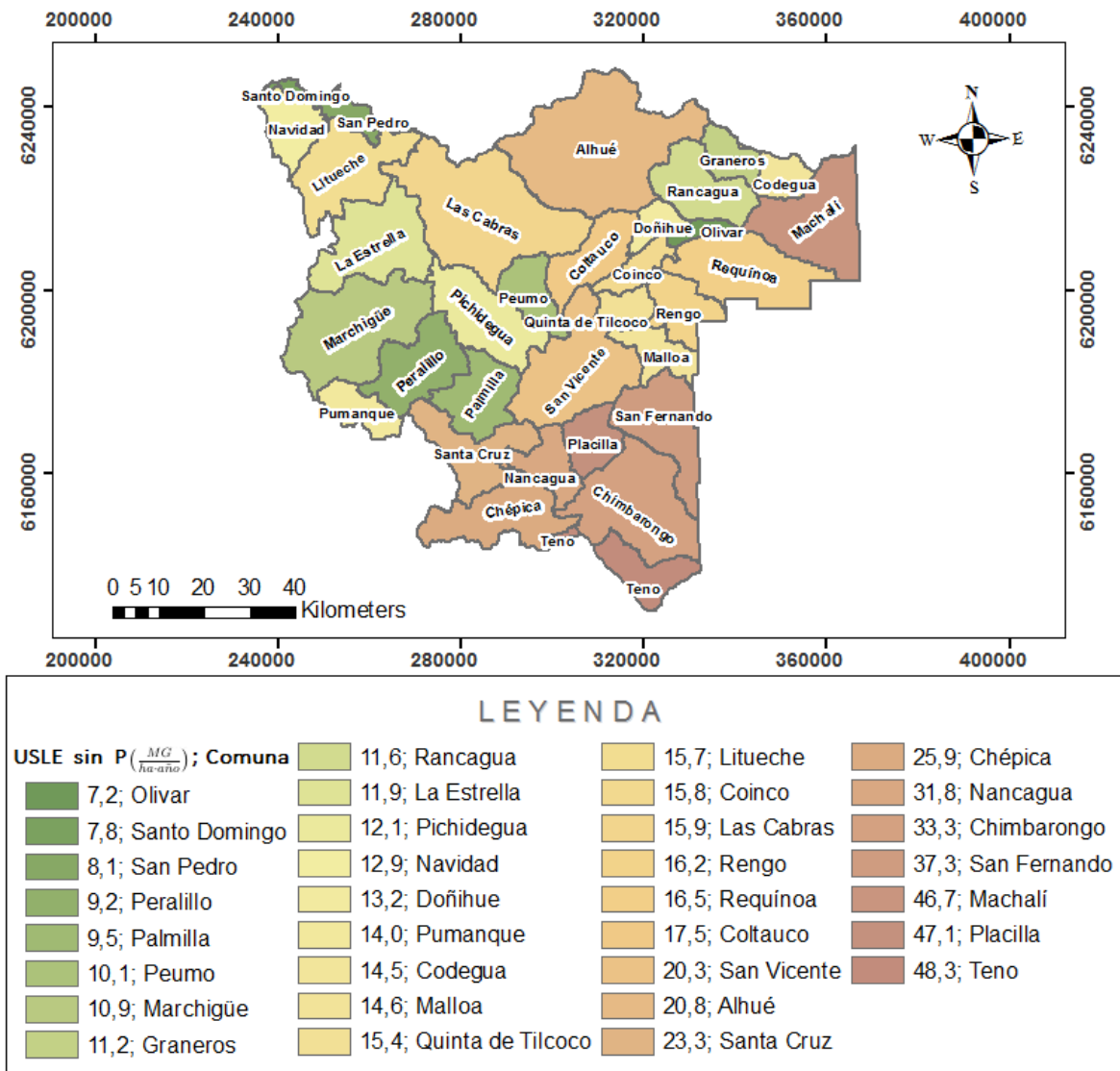


Figura 52 Mapa de razón de pérdida de suelo a escala comunal sin practica de conservación

Olivar presenta el valor más bajo de pérdida de suelo $7,2 \left(\frac{Mg}{ha-año} \right)$, lo cual posiblemente se deba a la topografía de la comuna, ya que esta se caracteriza por presentar bajos relieves al encontrarse en los sectores más planos de la cuenca de Rapel.

Teno es la comuna que presenta la mayor tasa de perdida de suelo $48,3 \left(\frac{Mg}{ha \cdot año} \right)$; este valor posiblemente esta correlacionado con la alta vulnerabilidad que presentan los suelos de Teno durante los meses de Mayo, Junio, Julio y Agosto, producto de la pausa agrícola de invierno y las altas precipitaciones que caen sobre la localidad, alcanzando valores de $R = 773 \left(\frac{MJ \cdot mm}{ha \cdot hora \cdot año} \right)$.

Tabla 20 Número de comunas según el intervalo de riesgo en escenario sin practica de conservación

Rango de perdida de suelo		Numero de comunas
Riesgo	$\left(\frac{Mg}{ha \cdot año} \right)$	
0-7	Bajo	0
7-15	Moderado	16
15-25	Alto	10
25-45	Muy Alto	4
45-60	Severo	3
>60	Muy Severo	0

La Tabla 20 resume la leyenda de la Figura 52 al agrupar a las comunas en intervalos de riesgos de perdida de suelo; en esta se indica que: ninguna comuna se encontraría en el rango bajo de riesgo, 16 comunas se encontrarían en el intervalo moderado de riesgo, y que 17 comunas presentarían un riesgo Alto, Muy Alto y Severo.

Este escenario es muy favorable para posibles medidas que detengan el avance de la erosión, ya que el recurso suelo a pesar de verse amenazado en todas las comunas, en ninguna se muestra un riesgo muy severo como para considerar que el recurso presentaría un desmedro irremediable a escala comunal.

7.2.2 Razón de pérdida de suelo con practica de conservación

Para estimar la erosión hídrica con practica de conservación a escala comunal, se hizo uso de la herramienta *Zonal Statistic Table* (ZST) del software ArcGIS sobre la imagen modelada de perdida de suelo con practica de conservación (Figura 50). Por medio de este método se obtiene el mapa de perdida de suelo que se muestra en la Figura 53, el cual señala a las comunas de Olivar y Machalí como los valores mínimo y máximo de taza de perdida de suelo, respectivamente

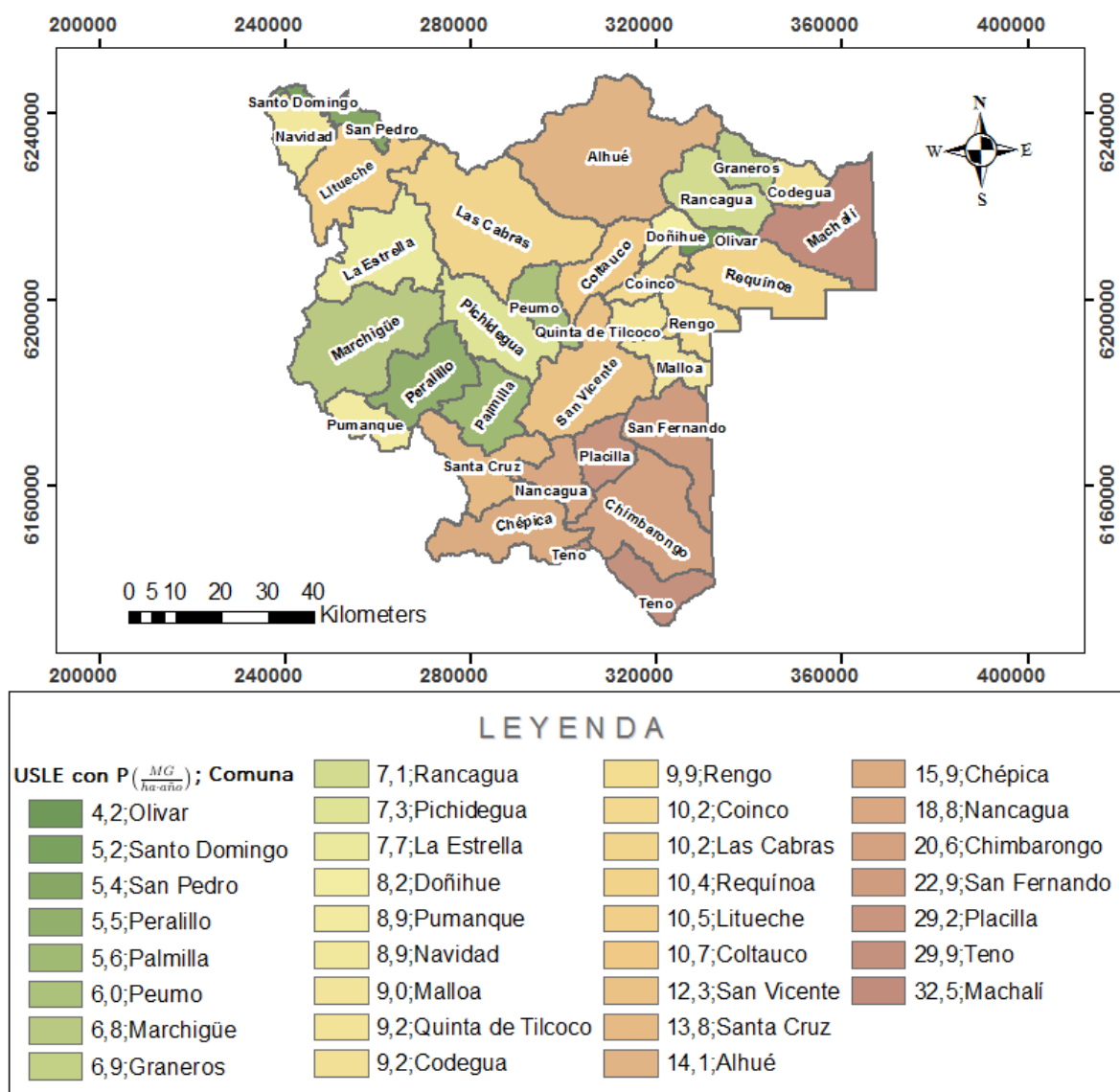


Figura 53 Mapa de razón de perdida de suelo a escala comunal con practica de conservación

Olivar presenta una disminución cercana a la mitad en la razón de pérdida de suelo luego de aplicar la práctica de conservación, dando así cuenta de la eficacia de la medida. Esto estaría correlacionado con el bajo valor modelado para la práctica de curvas de nivel ($P=0.58$), debido a las bajas pendientes de la comuna.

Machalí muestra una disminución cercana a un tercio en la razón de pérdida de suelo luego de aplicar la práctica de conservación. Esta comuna siendo parte de la cordillera de los Andes, presenta suelos cultivables de muy alta pendiente, por lo cual el valor modelado para la práctica curvas de nivel es el más alto ($P=0.7$); implicando que exhiba la menor eficacia de la práctica de conservación.

Tabla 21 Número de comunas según el intervalo de riesgo en escenario con practica de conservación

Rango de pérdida de suelo		Numero de comunas
Riesgo	$\left(\frac{Mg}{ha \cdot año}\right)$	
0-7	Bajo	8
7-15	Moderado	18
15-25	Alto	4
25-45	Muy Alto	3
45-60	Severo	0
>60	Muy Severo	0

La Tabla 21 resume la leyenda de la Figura 53 al agrupar a las comunas en intervalos de riesgos de pérdida de suelo; en esta tabla se observa que el 70% de las comunas pertenecen a los dos rangos más bajos de riesgo y que el 30% restante se encontrarían en los rangos de riesgos *Alto* y *Muy Alto*.

En este escenario se destaca la eficacia del cultivo en curvas de nivel, por lo que se confirmaría la importancia de fomentar prácticas de manejo de cultivos que favorezcan la conservación del recurso suelo.

Es importante aclarar que la práctica de conservación modelada en el presente trabajo, es un tipo de manejo de cultivo de bajo costo de implementación, pero su aplicación junto con requerir un límite de máxima pendiente de cultivo, también precisa de restringir la longitud máxima de pendiente. Debido a estas características la medida se vuelve menos efectiva en comparación a otras de mayor costo como lo son los *cultivos en terraza*, es por ello que los valores señalados por la Figura 53 podrían reducirse al aplicar la medida adecuada según el relieve de la comuna.

7.2.3 Análisis comparativo del uso y no uso de la práctica de conservación Curvas de nivel, a escala comunal

La efectividad de la práctica de conservación varía por comuna, lo cual es debido a las diferencias propias que guardan las mismas con respecto a su topografía. La Figura 54 muestra el mapa de variación de efectividad de la práctica de curvas de nivel en porcentaje, el cual señala a las comunas de Machalí y Olivar con el menor y mayor porcentaje de reducción de pérdida de suelo, respectivamente.

La comuna de Machalí exhibe una disminución del 30% en la razón de pérdida de suelo, siendo esta la menor reducción en la tasa de erosión de suelos, además de ser una de las comunas con mayores tasas de pérdida de este. Este escenario señalaría a los suelos de Machalí como los más vulnerables a la erosividad de la precipitación, por lo cual la aplicación de una práctica de conservación que sea acorde al relieve comunal, es fundamental para evitar la pérdida acelerada del recurso.

Olivar muestra la mayor eficacia en la práctica de conservación, la cual alcanza un poco más del 40%. La topografía de esta comuna presenta sectores de muy baja pendiente, cerca del 77% de la superficie comunal presentan pendiente bajo el 13%, por lo cual estos sectores se ven favorecidos con los valores más bajos del factor conservación, implicando en hasta una disminución del 50% la tasa de pérdida de suelo.

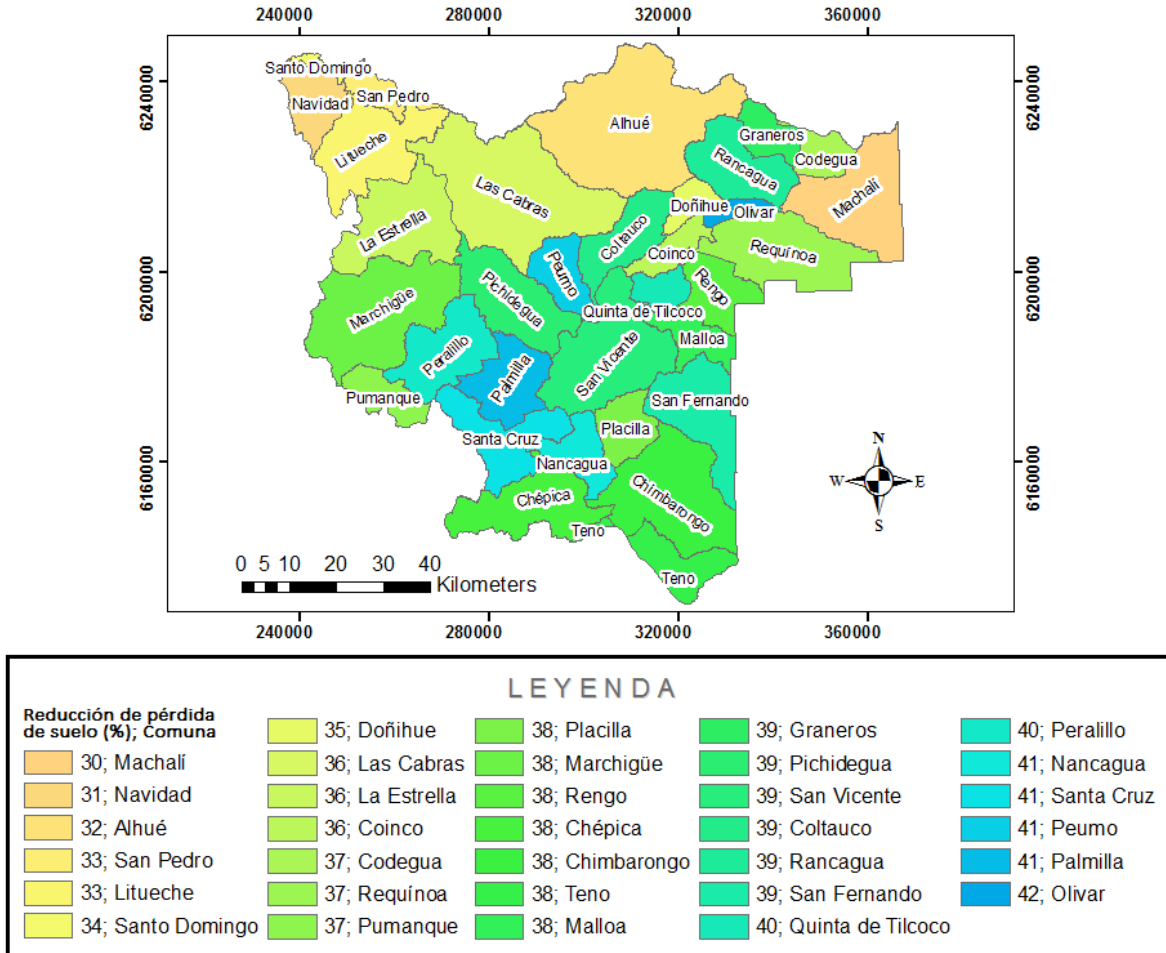


Figura 54 Reducción de pérdida de suelo en porcentaje

7.3 Cuantificación de superficie perdida por comuna

La razón de pérdida de suelo $\left(\frac{Mg}{ha \cdot año}\right)$ señala la velocidad de degradación de los suelos producto de la erosividad de la precipitación, pero no brinda información cuantificable de la pérdida de suelo en el total de toneladas o en la superficie perdida por año.

Los valores de pérdida de suelo por comuna son proporcionales a la superficie cultivada de suelo y a la razón de pérdida del mismo, por lo cual al ponderar ambos valores es posible identificar a aquellas comunas que presentan la mayor pérdida de suelo según la superficie cultivada. La Tabla 22 muestra la superficie cultivada por comuna en la cuenca de Rapel (INE 2007).

Tabla 22 Superficie cultivada por comuna

Comuna	Superficie cultivable (Ha)	Comuna	Superficie cultivable (Ha)
Alhué	84306	Palmilla	23431
Chépica	32575	Peralillo	28248
Chimbarongo	49587	Peumo	15410
Codegua	10151	Pichidegua	32080
Coinco	9866	Placilla	14474
Coltauco	22193	Pumanque	12654
Doñihue	8024	Quinta de Tilcoco	8603
Graneros	11079	Rancagua	26116
La Estrella	39373	Rengo	17480
Las Cabras	75308	Requínoa	39512
Litueche	36363	San Fernando	31041
Machalí	40756	San Pedro	8323
Malloa	13824	San Vicente	48390
Marchihue	55273	Santa Cruz	26576
Nancagua	15068	Santo Domingo	3072
Navidad	16589	Teno	18193
Olivar	4400		

A partir de los valores de razón de pérdida de suelo señalados en la Figura 52 y en la Figura 53, junto a la superficie de suelo cultivado por comuna (Tabla 22), se calculó la superficie y la proporción de suelo cultivable que potencialmente se perdería anualmente por la erosividad de las precipitaciones.

7.3.1 Superficie perdida de suelo cultivable por comuna

Haciendo uso del producto simple entre la razón de pérdida de suelo $\left(\frac{Mg}{ha \cdot año}\right)$ y la superficie cultivada (Ha) por comuna (Tabla 22), se calculan los mega gramos de suelo perdidos por

año $\left(\frac{Mg}{año}\right)$; al aplicar un factor de conversión de mega gramos a hectáreas a este último valor (0,5 Mg es a 1 ha); se obtienen las hectáreas perdidas por año $\left(\frac{ha}{año}\right)$ (Tabla 23).

Tabla 23 Superficie de suelo perdida anualmente por comuna según el uso y no uso de prácticas de conservación

Comuna	Con Practica $\left(\frac{ha}{año}\right)$	Sin Practica $\left(\frac{ha}{año}\right)$	Comuna	Con Practica $\left(\frac{ha}{año}\right)$	Sin Practica $\left(\frac{ha}{año}\right)$
La Estrella	1,4	2,1	Graneros	17,6	28,7
Litueche	3,0	4,4	Las Cabras	49,9	77,8
Marchihue	16,9	27,3	Machalí	33,1	47,5
Navidad	1,2	1,8	Malloa	15,5	25,1
San Fernando	112,4	183,3	Olivar	4,5	7,9
Chépica	76,4	124,4	Peumo	16,2	27,2
Chimbarongo	186,8	302,9	Pichidegua	39,5	65,3
Nancagua	58,0	98,0	Quinta de Tilcoco	23,4	39,0
Palmilla	26,8	45,3	Rengo	19,1	31,2
Peralillo	17,9	29,8	Requinoa	29,3	46,6
Placilla	67,5	108,7	San Vicente	83,5	137,7
Santa Cruz	58,9	99,6	Alhué	15,2	22,3
Rancagua	28,0	46,1	Teno	20,7	33,5
Codegua	8,9	14,0	Santo Domingo	0,4	0,6
Coinco	9,9	15,4	San Pedro	0,3	0,4
Coltauco	28,0	45,8	Pumanque	3,9	6,2
Doñihue	4,3	6,9			

La Figura 55 esquematiza en un gráfico de barras los valores señalados en la Tabla 23.

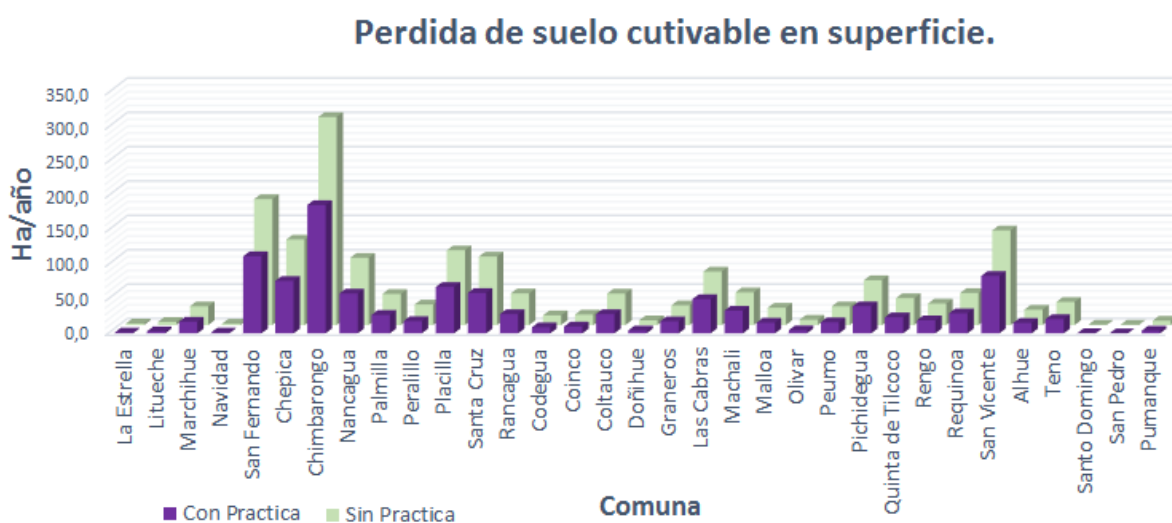


Figura 55 Pérdida de suelo cultivable en superficie por año

En la Figura 55 se puede observar que la comuna de San Pedro presenta la menor pérdida de superficie cultivable, al aplicar y no aplicar la práctica de conservación. Esta comuna se encuentra mayoritariamente dentro de la cuenca del Maipo, por lo cual la baja pérdida de superficie se debe en gran medida a que el total de la superficie cultivable en la cuenca de Rapel es muy baja.

Chimbarongo es una de las comunas más grandes de la cuenca de Rapel, sumando un total de 49.587 (ha) cultivables, además alcanzar altas tasas de pérdida de suelo a causa de la pausa agrícola de invierno ($C=0,75$) y a un gran valor de erosividad de la precipitación, $R = 541 \left(\frac{MJ \cdot mm}{ha \cdot hora \cdot año} \right)$. Es debido a estas razones por lo cual se produce un enorme arrastre de sedimentos provenientes del suelo cultivable, siendo esto traducido en un gran aumento de turbidez en los cuerpos de agua cercanos (Embalse convento viejo y Estero Chimbarongo), y en una alta pérdida de superficie cultivable. Este fenómeno es observable en escenario de uso y no uso de práctica de conservación (Figura 55).

Al estudiar el delta de la superficie cultivable perdida, en escenario de uso o no uso de practica de conservación, encontramos que Chimbarongo presentaría la mayor eficacia de la aplicación de la medida de conservación, al reducir en $116 \left(\frac{ha}{año} \right)$ la pérdida de superficie. Por otra parte, San Pedro muestra la menor eficacia al reducir en $0,14 \left(\frac{ha}{año} \right)$ la pérdida de superficie de suelo cultivable.

7.3.2 Proporción de suelo cultivable perdido

A partir de los datos de la Tabla 22 y la Tabla 23, se calculó los porcentajes de suelo cultivable perdido anualmente por comuna; estos valores se señalan en la Tabla 24.

Tabla 24 Porcentaje de suelo cultivable perdido anualmente

Comuna	Con Practica (%)	Sin Practica (%)	Comuna	Con Practica (%)	Sin Practica (%)
La Estrella	0,38	0,6	Graneros	0,34	0,56
Litueche	0,52	0,79	Las Cabras	0,51	0,79
Marchigüe	0,34	0,55	Machalí	1,63	2,33
Navidad	0,45	0,64	Malloa	0,45	0,73
San Fernando	1,14	1,86	Olivar	0,21	0,36
Chépica	0,79	1,29	Peumo	0,3	0,51
Chimbarongo	1,03	1,67	Pichidegua	0,37	0,6
Nancagua	0,94	1,59	Quinta de Tilcoco	0,46	0,77
Palmilla	0,28	0,47	Rengo	0,49	0,81
Peralillo	0,28	0,46	Requinoa	0,52	0,82
Placilla	1,46	2,35	San Vicente	0,61	1,01
Santa Cruz	0,69	1,17	Alhué	0,71	1,04
Rancagua	0,35	0,58	Teno	1,49	2,42
Codegua	0,46	0,73	Santo Domingo	0,26	0,39
Coinco	0,51	0,79	San Pedro	0,27	0,4
Coltauco	0,54	0,88	Pumanque	0,44	0,7
Doñihue	0,41	0,66			

La Figura 56 corresponde al gráfico de barras construido a partir de los valores señalados en la Tabla 24.

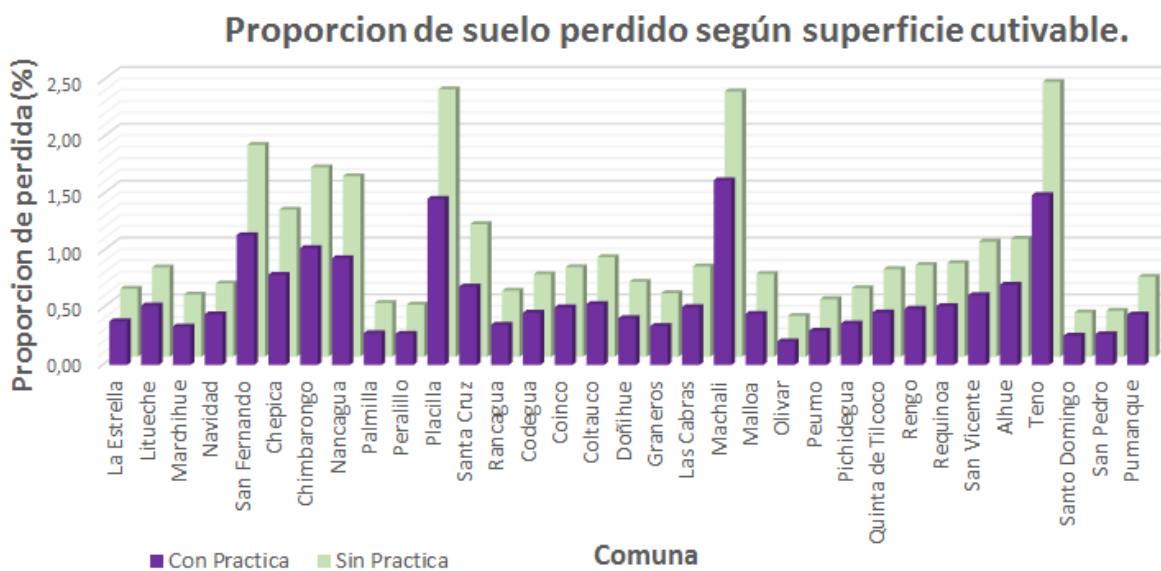


Figura 56 Proporción de suelo cultivable perdido en porcentaje por año

En la Figura 56 se puede observar que Olivar es la comuna con menor porcentaje de pérdida de suelo ya sea en escenario de uso o no uso de práctica de conservación; por otra parte Teno y Machalí son las comunas con mayor porcentaje de suelo cultivable perdido, en escenario de no uso y de uso de práctica de conservación, respectivamente.

Teno es la comuna con mayor erosividad de la precipitación $R = 773 \left(\frac{MJ \cdot mm}{ha \cdot hora \cdot año} \right)$, por su parte Machalí es una de las comunas con mayor valor de vulnerabilidad debido al relieve ($LS = 3,8$); por lo cual la práctica de conservación en Teno es más efectiva que en Machalí.

Al analizar el delta de mejoría en la reducción del porcentaje de pérdida de suelo, producto del uso de la práctica de conservación, Santo Domingo presenta la menor disminución al reducir en un 0,13% la pérdida de suelo cultivable, es importante señalar que esta comuna se encuentra en gran medida dentro de la cuenca del Maipo, por lo cual el valor anteriormente señalado es solo aplicable a la superficie correspondiente a la cuenca de Rapel.

La comuna de Teno es la que presenta la mayor eficacia de la medida al reducir en un 0.92% la pérdida de superficie cultivable, implicando en que la aplicación de la práctica de conservación jugaría un rol clave en la conservación del recurso suelo.

VIII. CONCLUSIONES

El aumento del conocimiento técnico para la gestión de los sistemas socio-económicos, es clave para la implementación de un plan de ordenamiento territorial que propicie las actividades de aprovechamiento y cuidado de los recursos naturales. Esto sí y solo si en la medida que tales actividades de uso sean compatibles, complementarias o sinérgicas entre ellas.

El protocolo para la estimación de la pérdida de suelo en la cuenca de Rapel que fue desarrollado en este trabajo, juega un rol clave para el aumento del conocimiento de los instrumentos que permiten evaluar el estado del recurso natural suelo de la cuenca. La aplicación de este protocolo da pie al discernimiento técnico para la comprensión sobre la potencial pérdida y su correspondiente conservación del recurso natural suelo.

La USLE como todo modelo de sistemas naturales, precisa del manejo de un gran volumen de información, para lo cual los Sistemas de Información Geográficos (SIG) son muy apropiados. La información de entrada necesaria para la aplicación de la USLE en SIG es muy diversa, por lo cual se caracteriza por presentar distintos grados de complejidad y exclusividad, es por ello que en el presente trabajo solo se hizo uso de aquella información de fácil acceso que representara el menor coste de adquisición.

Los factores que dan forma a la USLE cuentan de características muy diversas por lo cual influyen de modo distinto en el modelo. Esto le permite una gran versatilidad al modelo al adaptarse a las características físicas de cada sitio.

El efecto de cada factor varía dentro de una misma región, por lo cual para la obtención de una visión holística de la pérdida de suelo, es preciso la integración de todos los factores en un mismo escenario, el cual es la cuenca Hidrográfica. En la cuenca de Rapel, la alta presencia de Alfisoles da cuenta de suelos mayoritariamente de textura arcillosa y poco

permeables, por lo que se favorece el arrastre de sedimentos (factor K alto). El relieve montañoso producto de la Cordillera de la Costa y de los Andes, además de limitar la superficie de cultivo también da pie a la actividad agrícola en pendientes altas (cercanas a 21%), por lo que se favorece el arrastre de sedimentos y, con ello, la erosión de los suelos (factor LS alto.)

La ausencia de cubierta vegetal en algunos sectores de la cuenca debido a la pausa agrícola de invierno o simplemente a la deforestación a que han sido sometidas estas áreas, impide la protección escudo del dosel arbóreo y la hojarasca, junto con disminuir el agarre de suelo por la rizosfera favoreciendo el arrastre de sedimentos (factor C alto); por otra parte también es posible observar como los cultivos forestales y de secano en suelos empinados de la cordillera de la costa, juegan un gran rol de disminución en el arrastre de sedimentos (factor C bajo)

La principal función de la práctica de conservación es cortar las líneas de escorrentía y con ello disminuir el arrastre de sedimentos; para este trabajo se hizo uso de la práctica de curvas de nivel, siendo su aplicación más óptima en aquellas superficies de pendientes moderadas (P bajo), donde los resultados muestran una fuerte disminución de la pérdida de suelo.

La evaluación de la pérdida del recurso suelo por medio de la USLE, puede ser abordada por medio de dos enfoques igualmente válidos: la velocidad o razón de pérdida de suelo $\left(\frac{Mg}{ha \cdot año}\right)$ o por medio superficie cultivable perdida $\left(\frac{ha}{año}\right)$, la primera informa sobre la pérdida de sedimentos según superficie y tiempo, por otra parte la segunda brinda una visión sobre la magnitud en que se reduce la superficie cultivable al año.

Como se mencionó previamente, el enfoque de cuenca hidrográfica permite la integración de todos los factores biofísicos y sociales para la toma de decisiones localmente sostenibles;

pero en la actualidad las decisiones políticas son a escala comunal, es por ello que brindar una visión sobre el estado de la pérdida de suelo promedio a esta escala. Esto puede ser una herramienta poderosa para sensibilizar a las autoridades locales sobre el riesgo a que esta sometido un importante recurso como lo es el suelo.

El estudio de la pérdida de suelo en $\left(\frac{Mg}{ha \cdot año}\right)$, permite la identificación de aquellas zonas o comunas que están perdiendo suelo a mayor velocidad, y con ello determinar las principales causas de afectación y sus posteriores medidas de cuidado del recurso.

La estimación por medio de superficie cultivable perdida $\left(\frac{ha}{año}\right)$, permite comprender en cuanto y en que proporción se reducen los suelos cultivables, dando una mejor idea de la pérdida de potencialidad productiva en una región.

Para ambos enfoques se encuentra como al aplicar la medida de conservación *Curvas de nivel* en la cuenca de Rapel, aun sin reparar en tipos de cultivos o suelo estudiados, es posible observar una importante disminución en la degradación del recurso natural a escala de cuenca hidrográfica y comuna. Lo anterior da pie a pensar sobre como las medidas de conservación apropiadas a cada escenario favorecerían en un mayor grado la conservación del recurso suelo.

La desertificación es originada por actividades antrópicas inadecuadas y persistentes, que conducen a la erosión de los suelos y con ello a la degradación del recurso. La formación del suelo requiere decenas de miles de años, no obstante lo cual, el mal uso de este puede llevarlo a la degradación total en unas pocas decenas de años.

El aporte del protocolo que se desarrolló en este trabajo, radica en ser una buena herramienta integradora para el seguimiento del proceso de desertificación producto de la erosividad de la precipitación en la cuenca de Rapel. Su idoneidad debe a la integración holística de los principales factores involucrados en la erosión hídrica.

IX. REFERENCIAS

- Almorox Alonso, Javier. 1994. *Métodos de estimación de la erosión hídrica*.
- HAMMOND BENNETT, Hugo, "Elementos de conservación del suelo", Fondo de cultura económica, México, 1965, pág.5.
- Biesemans, Jan, Marc Van Meirvenne, y Donald Gabriels. 2000. "Extending the RUSLE with the Monte Carlo error propagation technique to predict long-term average off-site sediment accumulation". *Journal of Soil and Water Conservation* 55(1): 35–42.
- Bonilla, Carlos A, y Karim L Vidal. 2011. "Rainfall erosivity in central Chile". *Journal of Hydrology* 410(1–2): 126–33.
- CEBRIAN, LA. 1988. "Aplicaciones de la informática a la Geografía y Ciencias Sociales". Madrid. Ed. Síntesis, 1988.
- CIREN. 1996. *Estudio agrológico VI Región. Descripción de suelos materiales y símbolos*. CIREN.
- DGA. 2004. *Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad*. ed. CADE-IDEPE consultores en ingeniería.
- Edwards, Keith. 1987. *Runoff and soil loss studies in New South Wales*. Soil Conservation Service of NSW.
- Ellies, A. 2000. "Soil erosion and its control in Chile-An overview". *Acta geológica hispánica* 35(3): 279–84.
- Eswaran, Hari, Rattan Lal, P F Reich, y Otros. 2001. "Land degradation: an overview". *Responses to Land degradation*: 20–35.

FAO. 2006. "ESTRUCTURA DEL SUELO"

http://www.fao.org/fishery/static/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706s/x6706s07.htm#top (9 de enero de 2019).

Flores, J. P., Martínez, E., Espinosa, M., Ahumada, I., Avendaño, P., Henríquez, G., & Torres, P. (2010). Determinación de la erosión actual y potencial de los suelos de Chile: Región de La Araucanía. Síntesis de Resultados.(Pub. CIREN N° 149).

Food, F A O. 2007. "Agriculture Organization of the United Nations, 2007: La nueva generación de programas y proyectos de gestión de cuencas hidrográficas". *Roma, Italia: Estudio FAO, Montes.*

Freeman, T Graham. 1991. "Calculating catchment area with divergent flow based on a regular grid". *Computers & Geosciences* 17(3): 413–22.

García-Ruiz, José M et al. 2005. "Soil erosion and runoff generation related to land use changes in the Pyrenees". En *Global Change and Mountain Regions*, Springer, 321–30.

González Fuertes, Max José, y Otros. 2014. "Análisis de los coeficientes de escorrentía y su relación con el cambio de cobertura vegetal de la cuenca superior del río Catamayo". [http://www.oasification.com/archivos/Coeficientes de escorrentía.pdf](http://www.oasification.com/archivos/Coeficientes%20de%20escorrentia.pdf) (26 de marzo de 2019).

Guevara, E. 1997. *Manejo integrado de cuencas. Documento de referencia para los países de América Latina.* FAO.

Ibañez Asensio, Sara, Juan Manuel Gisbert Blanquer, y Héctor Moreno Ramón. 2011a. "Alfisoles".

- Ibañez Asensio, Sara, Juan Manuel Gisbert Blanquer, y Héctor Moreno Ramón.. 2011b. "Entisoles". <https://riunet.upv.es/handle/10251/12883/> (18 de marzo de 2019).
- Ibañez Asensio, Sara, Juan Manuel Gisbert Blanquer, y Héctor Moreno Ramón. 2011c. "Inceptisoles". <https://riunet.upv.es/handle/10251/12884> (11 de marzo de 2019).
- Ibañez Asensio, Sara, Juan Manuel Gisbert Blanquer, y Héctor Moreno Ramón.. 2011d. "Mollisoles". <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/13609/Mollisoles.pdf> (11 de marzo de 2019).
- Ibañez Asensio, Sara, Juan Manuel Gisbert Blanquer, y Héctor Moreno Ramón.. 2011e. "Vertisoles". <https://riunet.upv.es/handle/10251/12869?show=full> (11 de marzo de 2019).
- ICONA. 1991. "La ecuación universal de pérdidas de suelo. Pasado, presente y futuro". *Ecología* 5: 133–50.
- INE. 2007. "VII Censo Agropecuario y Forestal". *Instituto Nacional de Estadística*.
- Instituto de Asuntos Públicos, Universidad de Chile. 2003. *Informe país, estado del medio ambiente en Chile 2002*. Lom Ediciones.
- Van der Knijff, J M, R J A Jones, y L Montanarella. 2000. "Soil erosion risk: assessment in Europe".
- Lal, Rattan. 2017. "Soil erosion by wind and water: problems and prospects". En *Soil erosion research methods*, Routledge, 1–10.
- Lara, J, J Posada, y J Moreno. 1998. "Los sistemas de información geográfica". En *Rodríguez García, J. y Collado Machuca, JC (eds.). Andalucía en el umbral del Siglo XXI. Congreso de Ciencia Regional de Andalucía (1. 1997. Jerez de la Frontera), 789-804,*.

Lee, Saro. 2004. "Soil erosion assessment and its verification using the universal soil loss equation and geographic information system: a case study at Boun, Korea". *Environmental Geology* 45(4): 457–65.

Leighton, Walter Luzio. 2010. *Suelos de Chile*. Universidad de Chile.

Lin, Wen-Tzu, Chao-Yuan Lin, y Wen-Chieh Chou. 2006. "Assessment of vegetation recovery and soil erosion at landslides caused by a catastrophic earthquake: a case study in Central Taiwan". *Ecological Engineering* 28(1): 79–89.

Liu, B Y, M A Nearing, P J Shi, y Z W Jia. 2000. "Slope length effects on soil loss for steep slopes". *Soil Science Society of America Journal* 64(5): 1759–63.

MAPAMA. 2008. "Pendientes límite de cultivo y pastizal. Definición a partir de las experiencias del I.F.I.E."

Mitasova, Helena, y Lubos Mitás. 2001. "Multiscale soil erosion simulations for land use management". En *Landscape Erosion and Evolution Modeling*, Springer, 321–47.

MMA. 2019. "Listado de especies amenazadas".
http://especies.mma.gob.cl/CNMWeb/Web/WebCiudadana/WebCiudadana_busquedaGrilla.aspx?especies=amenazadas (11 de marzo de 2019).

Moore, Ian D, y John P Wilson. 1992. "Length-slope factors for the Revised Universal Soil Loss Equation: Simplified method of estimation". *Journal of soil and water conservation* 47(5): 423–28.

Narro Farías, Eduardo. 1994. *Física de Suelos: con enfoque agrícola*. Trillas,.

NASA, EARTH DATA. 2011. "ASTER Global Digital Elevation Model V002".
[https://search.earthdata.nasa.gov/search?m=-53.6484375!-72.755859375!4!1!0!0%2C2&ff=Map Imagery!Map Imagery](https://search.earthdata.nasa.gov/search?m=-53.6484375!-72.755859375!4!1!0!0%2C2&ff=Map+Imagery!Map+Imagery) (10 de junio de 2018).

- Ostrom, Elinor. 2009. "A general framework for analyzing sustainability of social-ecological systems". *Science* 325(5939): 419–22.
- Pinilla Ruiz, Carlos. 1995. *Elementos de teledetección*.
- Renard, Kenneth G et al. 1997. *703 Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)*. United States Department of Agriculture Washington, DC.
- Renard, Kenneth G, y Jeremy R Freimund. 1994. "Using monthly precipitation data to estimate the R-factor in the revised USLE". *Journal of hydrology* 157(1–4): 287–306.
- Saintraint, Dominique, y Petrus Henricus Maria Sloom. 1993. *La erosión potencial de los suelos en Argentina, Bolivia, Brasil, Chile y Paraguay*.
- Sánchez Vélez, Alejandro S, García Núñez, Palma Trujano, y Otros. 2003. *La cuenca hidrográfica como unidad básica de planeación y manejo de recursos naturales*.
- Santibañez, F et al. 2017. "Atlas agroclimático de Chile : estado actual y tendencias del clima : Regiones de Valparaíso, Metropolitana, O'Higgins y del Maule" ed. Centro de Agricultura y Medioambiente de Chile.
- Santibañez, Fernando. 1994. "II Curso Interamericano Diseños de Proyectos de Riego y drenaje: Tema III Balance Hídrico y Demandas de Riego".
- Tayupanta, Jorge R. 1993. *La erosión hídrica: proceso, factores y formas*. INIAP Archivo Historico.
- Thornes, J B. 1985. "The ecology of erosion." *Geography*, 70 (3), pp. 222-235. Cited 131 times.
- Tisdall, Judith M, y J_M Oades. 1982. "Organic matter and water-stable aggregates in soils". *Journal of soil science* 33(2): 141–63.

- Tweddales, S C, C R Eschlaeger, y William F Seybold. 2000. "An improved method for spatial extrapolation of vegetative cover estimates (USLE/RUSLE C factor) using LCTA and remotely sensed imagery". Tweddales, S C, C R Eschlaeger, y William F Seybold. 2000. "An improved method for spatial extrapolation of vegetative c". *US Army Corps of Engineers, Engineer Research and Development Center, Construction Engineering Research Laboratory, ERDC Technical Report.*
- USGS. 2018. "Landsat 8 OLI/TIRS C1 Level-2". <https://earthexplorer.usgs.gov> (22 de octubre de 2018).
- Vannote, Robin L et al. 1980. "The river continuum concept". *Canadian journal of fisheries and aquatic sciences* 37(1): 130–37.
- Wang, G, S Wente, G Z Gertner, y A Anderson. 2002. "Improvement in mapping vegetation cover factor for the universal soil loss equation by geostatistical methods with Landsat Thematic Mapper images". *International Journal of Remote Sensing* 23(18): 3649–67.
- Wischmeier, Walter H, Dwight David Smith, y Otros. 1978. "Predicting rainfall erosion losses-a guide to conservation planning." *Predicting rainfall erosion losses-a guide to conservation planning.*

ANEXO A. ASPECTOS SOBRE EL SUELO

A.1. Composición del Suelo

El suelo es un sistema altamente heterogéneo y disperso, compuesto por partículas sólidas, agua y aire, las cuales están dispuestas en fase (Figura 57) La fase sólida del suelo proviene principalmente de la descomposición de rocas y residuos vegetales, y es relativamente estable en cuanto a composición y organización.

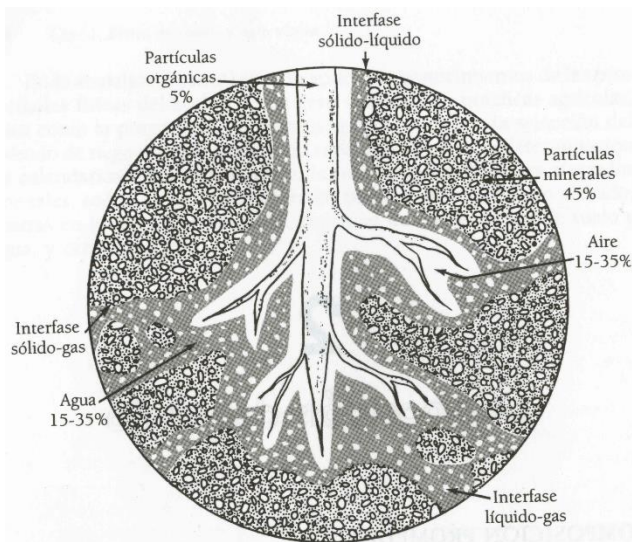


Figura 57 Medio trifásico del suelo

Las fases líquida y gaseosa, están en constante movimiento debido a la evaporación y a la absorción del agua por las plantas, a la reposición periódica del agua por medio de la lluvia o del riego, a la difusión de gases y desplazamiento masivo del aire del suelo, lo que puede renovar el aire de los poros varias veces al día (Narro Farías 1994).

A.1.1 Fase Sólida

La fase sólida del suelo es la fuente de la mayoría de los nutrientes vegetales, es el almacén del agua requerida por las plantas. Esta fase está constituida por gran cantidad de partículas sólidas, las cuales poseen una enorme área superficial por unidad de volumen de suelo, lo cual produce o favorece los fenómenos relacionados con la actividad interfacial: intercambio iónico, adsorción, adhesión, capilaridad, agregación y dispersión. La fase sólida está constituida por componentes inorgánicos y componentes orgánicos.

A.1.1.1 Componentes inorgánicos.

Corresponde a partículas minerales que derivan del intemperismo de las rocas existentes sobre la superficie de la tierra, las cuales pueden ser, según su origen, ígneas, metamórficas o sedimentarias.

Los minerales se clasifican en primarios y secundarios: Los *minerales primarios* son aquellos que no han sufrido cambios químicos desde su formación inicial a partir de la cristalización del magma, manteniendo una composición química inalterada y un tamaño mayor a 2 μm , por otra parte, los *minerales secundarios* se forman debido al intemperismo que actúa sobre los minerales primarios, generando una estructura y composición química diferente de éstos, y presentan un tamaño menor a 2 μm . Otros de los minerales presente en los suelos están los óxidos no combinados y sales.

La Tabla 25 muestra la clasificación de partículas minerales de acuerdo con el Departamento de Agricultura de Estados Unidos (DAEU) y por la Sociedad Internacional de la Ciencia del Suelo (SICS).

Tabla 25 Clasificación de partículas minerales

Fracción del suelo	Rango de diámetros (mm)	
	DAEU	SICS
Arena muy gruesa	2,00 - 1,00	
Arena gruesa	1,00 - 0,50	2,00 - 0,20
Arena media	0,50 - 0,25	
Arena fina	0,25 - 0,10	0,20 - 0,02
Arena muy fina	0,10 - 0,05	
Limo	0,05 - 0,002	0,02 - 0,002
Arcilla	0,002>	0,002>

DAEU: Departamento de Agricultura de Estados Unidos
SICS: Sociedad Internacional de la Ciencia del Suelo

A.1.1.2 Materia Orgánica del Suelo

Las mejores condiciones físicas, químicas y biológicas para los cultivos se encuentran preferentemente en los suelos con alto contenido de materia orgánica, la cual procede directa e indirectamente de las plantas (superiores, briofitas, algas etc.) y bacterias fotosintéticas. La mayor concentración de materia orgánica se encuentra generalmente en el suelo superficial, debido a que en esta zona del suelo crecen la mayoría de las raíces y las condiciones de humedad, fertilidad, aireación y temperatura son más adecuadas para los seres vivos, por lo cual es en esta profundidad donde las propiedades físicas que favorece la materia orgánica, tales como la formación de agregados y la estructuración del suelo se hacen presente (acción cementante de la materia orgánica).

La presencia de materia orgánica produce variados cambios en la superficie del suelo, entre los que podemos mencionar el aumento de la resistencia del suelo al impacto de gotas de lluvias, otorgando un factor de protección contra la erosión hídrica de salpicamiento debido al efecto de amortiguamiento que genera

La Tabla 24 señala la clasificación de materia orgánica en los suelos según el método Walkley - Black, lo cual permite identificar aquellos suelos que presentan un mayor grado de protección frente a la erosión hídrica.

Tabla 26 Clasificación de materia orgánica según Walkley - Black

Clase	Materia Orgánica (%)
Extremadamente pobre	0,00 - 0,60
Pobre	0,61 - 1,20
Medianamente pobre	1,21 - 1,80
Mediano	1,81 - 2,40
Medianamente Rico	2,41 - 3,00
Rico	3,01 - 4,20
Extremadamente rico	>4,20

A.1.2 Fase Líquida y Fase Gaseosa

La mayor parte de la fase líquida del suelo está constituida por agua, la cual generalmente se encuentra alojada en los poros del suelo con diámetro menor a 10 μm , puesto ya que los poros de mayor tamaño drenan fácilmente el agua y suelen permanecer ocupados por aire, excepto cuando las condiciones del suelo impiden el libre drenaje. La fase líquida contiene sales en solución, sólidos orgánicos en suspensión y es afectada por los coloides del suelo.

El aire del suelo constituye la fase gaseosa; la cual está compuesta por una mezcla de gases similar en especies y concentración a la atmosférica. Algunos de sus componentes, especialmente el oxígeno, son indispensables para el desarrollo de los cultivos, y otros como el dióxido de carbono, pueden producir efectos tóxicos para las plantas al encontrarse en altas concentraciones.

A.2. Propiedades físicas del suelo

El suelo es una mezcla porosa de partículas inorgánicas, partículas orgánicas, agua y aire; donde las dos primeras pueden estar dispuestas de modo tal que forman agregados o pedos, los cuales constituyen la matriz o esqueleto del suelo. Las propiedades físicas del suelo se refieren, en general, a la forma en como se ve o se siente el suelo según la disposición de sus agregados. Estas propiedades ejercen influencia directa o indirecta en todas las funciones que el suelo desempeña; es por ello que a continuación se definen las principales propiedades físicas.

A.2.1 Textura

Es un indicador de la proporción relativa de arena, limo y arcilla que constituyen al suelo. La determinación de esta propiedad física, se basa en un análisis granulométrico, el cual consiste en la separación y cuantificación de las partículas, junto a la consulta del triángulo

de textura. Cabe señalar que en este trabajo, para la clasificación de textura, se empleó el triángulo propuesto por el Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA).

A.2.2 Estructura

La estructura del suelo es la manera en que sus partículas primarias (arena, limo y arcilla) están ensambladas formando unidades mayores secundarias denominados agregados o peds, esta propiedad física es la de mayor importancia agrícola.

La formación de agregados se produce por la aglomeración de partículas minerales del suelo (sobre todo arcillas) a partir de fuerzas meramente físicas, como la floculación, compresión y compactación. Sin embargo la estabilidad de los mismos proviene de la acción cementante que ejercen la materia orgánica, tanto viva como en descomposición, y algunos coloides minerales, como la caliza activa o los hidróxidos de hierro o aluminio (Tisdall y Oades 1982).

Los agregados del suelo son sólidos definidos por formas geométricas más o menos regulares, de las que se definen dos grandes tipos, lo de estructura amorfa y estructura organizada, los primeros se caracterizan por constitución masiva, compacta, continua o de grano simple; y los segundos, las partículas constituyen agregados de forma definida. A continuación, se describen brevemente los tipos de estructuras organizadas.

A.2.2.1 Tipos de estructuras organizadas

Laminar

Partículas de suelo están agregadas en laminas o capas finas y se distribuyen a lo largo de un plano generalmente horizontal, a menudo estas laminas se traslapan dificultando la circulación de agua (FAO 2006).



Figura 58 Estructura Laminar

Prismoide

Las partículas se agrupan alrededor de una línea vertical, formando unidades limitadas por superficies verticales, relativamente planas. En este tipo de estructura el agua circula con mayor dificultad y el drenaje es deficiente (FAO 2006)

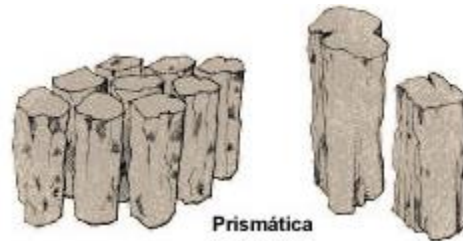


Figura 59 Estructura Prismoide

Blocosa

Las partículas están dispuestas alrededor de un punto central y limitadas por superficies planas o algo redondeadas. Este tipo de estructura se divide en dos subtipos: bloques angulares, donde los terrones están limitados por superficies planas que forman ángulos o bordes más o menos agudos; y bloques subangulares, donde los terrones están limitados por superficies redondeadas (FAO 2006).

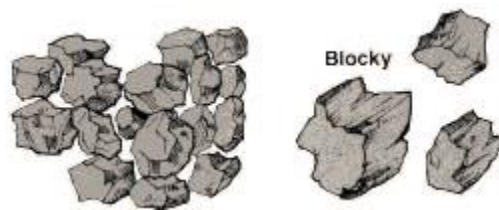


Figura 60 Estructura Blocosa

Esferoidal o Granular

Son partículas individuales de arena, limo y arcilla agrupadas en granos pequeños casi esféricos, se distribuyen alrededor de un punto central y están limitados por superficies redondeadas o irregulares, permitiendo que el agua circule muy fácil. (FAO 2006).

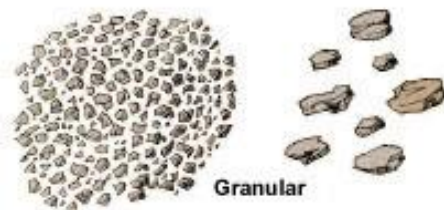


Figura 61 Estructura Esferoidal

A.3. Tipos de erosión hídrica

Se reconocen distintos tipos de erosión hídrica acelerada, los cuales se distinguen por la profundidad relativa y la estabilidad de los canales labrados por el escurrimiento. A continuación se definen brevemente algunas de las formas de erosión hídrica.

Erosión por Salpicamiento

Dispersión de los agregados del suelo debido al impacto de las gotas de lluvia sobre la superficie del terreno; la cantidad de suelo erosionado depende de la clase de suelo y la pendiente (Tayupanta 1993).

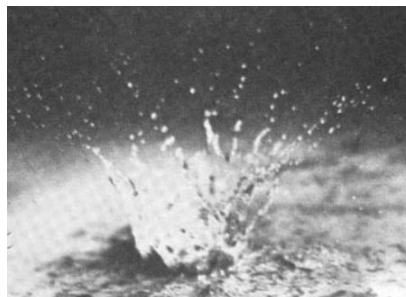


Figura 62 Erosión por Salpicamiento

Erosión Laminar o mantiforme

Remoción del suelo en capas delgadas, producto de la saturación del suelo y el desplazamiento superficial por la pendiente. Es la forma más peligrosa de erosión hídrica, debido a la pérdida imperceptible con la que inicia. Este tipo de erosión es frecuente en suelos arenosos (Tayupanta 1993)



Figura 63 Erosión por lamina

Erosión por Surcos o digital

Se presenta cuando la esorrentía se concentra en pequeñas irregularidades en la superficie del terreno, hasta que la acumulación de agua adquiere volumen y velocidad suficiente para deslizarse por la pendiente. Este proceso genera en su recorrido cortes en forma de canales o surcos (Tayupanta 1993).



Figura 64 Erosión por Surcos

Erosión por Zanjas o cárcavas

Las cárcavas son canales profundos de paredes empinadas; se observan con mayor frecuencia en suelos profundos y frágiles, producidas por un desprendimiento del suelo a causa del flujo del agua e inestabilidad de la pendiente. Cuando hay una gran concentración de escorrentía, en determinadas zonas del terreno, las cárcavas van ampliándose en ancho y profundidad año tras año (Tayupanta 1993). La formación de cárcavas trae consigo

pérdida de suelo, cambio en el régimen térmico, pérdida en la calidad del relieve, pérdidas en la capacidad de reserva de agua.



Figura 65 Erosión por Zanjas

ANEXO B. ASPECTOS SOBRE SISTEMAS DE INFORMACION GEOGRAFICA

B.1. Modelos cartográficos

B.1.1 Modelo vectorial

La representación espacial de los objetos en un modelo vectorial se basa en la codificación de sus fronteras.

La localización de puntos individuales según determinadas coordenadas, viniendo estas definida por funciones matemáticas, permite que se puedan representar objetos espaciales con puntos, líneas y polígonos, y con ello codificar sus fronteras (Lara, Posada, y Moreno 1998).

Los puntos, las líneas y los polígonos son las unidades que contienen la información, y al tratarse de funciones tiene la ventaja de que su representación gráfica mantiene siempre el mismo tamaño del trazo, debido a que este no posee magnitud (líneas mantienen el mismo grosor). En este modelo la unidad básica de representación gráfica es el punto, la línea toma el rol de límite y está determinada por un punto de origen y otro final, cada uno con sus respectivas coordenadas, por otra parte un polígono está determinado por varias líneas y encierra un área definida.

Estos elementos (punto, línea y polígono) pueden añadir a los campos contenidos otros atributos, tanto nominales como numéricos, permitiendo reflejar más de un atributo en un mismo espacio.

Dentro de los formatos informáticos que representen datos espaciales vectorialmente, encontramos al formato Shapefile.

B.1.2 Modelo Raster

En un modelo de datos raster, la realidad es representada a través de superficies determinadas que quedan dispuestas en forma de matriz, en la que cada elemento está representado por una celda, por lo cual no se codifican las fronteras de los objetos, sino que se registra el interior de los mismos, quedando sus límites implícitamente representados (Lara, Posada, y Moreno 1998)

En este tipo de codificación (forma de matriz), la representación cartográfica queda dividida en celdas a manera de teselas de un mosaico, que agrupadas o en unidades, representan los objetos de la realidad. La Figura 66 muestra como con la rasterización las celdas quedan identificadas en un diagrama cartesiano, formando los objetos sin límites definidos y dando cuenta que la resolución de los mismos solo está en función del tamaño de las celdas.

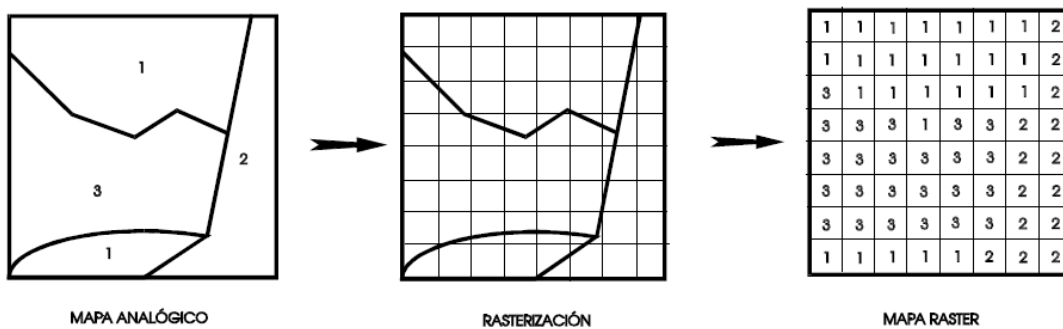


Figura 66 Cambio del formato analógico al digital

El modelo raster digitaliza el mundo real transformando los elementos a representar en píxeles o celdas. De este modo, cada celda tiene un valor que la identifica y/o agrupa entre las demás, lo que resulta especialmente útil para representar fenómenos que se manifiestan en el territorio (Lara, Posada, y Moreno 1998). Es especialmente útil en estudios de impacto ambiental, ya que es posible traducir la realidad a formato digital con un antes y un después.

B.1.3 Comparación entre modelos

La elección de un modelo u otro dependerá de si las propiedades topológicas son importantes para el análisis. Si es así, el modelo de datos vectorial es la mejor opción, pero debido a su estructura de datos muy precisa, el manejo de datos se complejiza, lo cual puede implicar en una ralentización del proceso. Por ello, si el análisis de interés no requiere acudir a las propiedades topológicas, es mucho más rápido, sencillo y eficaz el uso del formato raster.

También es más fácil decantarse por una estructura de datos vectorial cuando hay que reflejar más de un atributo en un mismo espacio. Usar un formato raster requeriría crear una capa distinta para cada atributo.

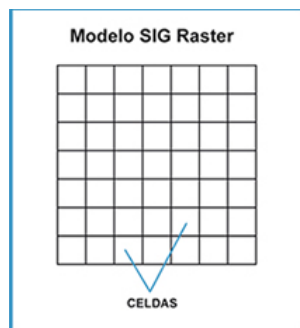


Figura 67 Modelo SIG

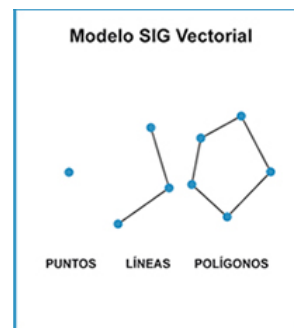


Figura 68 Modelo SIG Vectorial

B.2. Modelo de elevación digital (DEM)

El Modelo de elevación digital (DEM) describe la altimetría de una zona mediante una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de la altitud de la superficie del terreno. La unidad básica de información en un DEM es un punto acotado, definido por tres variables (x , y , z), donde z corresponde al valor de altitud, al que lo acompañan valores x e y , cuales representan las coordenadas.

Al evaluar este concepto en una elevación natural de terreno, donde la topografía puede describirse como una función bivariable continua $z = \zeta(x, y)$, z representa la altitud del

terreno en el punto de coordenadas (x,y) y ζ una función que relaciona la variable altitud con su localización geográfica. En un modelo de elevaciones digital se aplica la función anterior sobre un dominio espacial concreto D , siendo este finito, por lo cual la función no es continua ya que se resuelve en los intervalos discretos, a diferencia de una elevación natural donde el dominio es infinito.

La relación que describe genéricamente las variantes espaciales de altitud es:

$$DEM = (D, \zeta) \quad \text{Ecuación 16}$$

Para la construcción de un DEM se precisa la captura de información de curvas hipsométricas, las cuales indican el porcentaje de área de la cuenca o bien la superficie de la cuenca que existe por encima de cierta cota determinada. Esto lo podemos ver de una forma más sencilla en la Figura 69, donde se señala la altura y el porcentaje del área de la cuenca que presenta dicha altura, por ejemplo la curva A muestra que aproximadamente a 0.9 de altura tenemos el 20% del área de la cuenca.

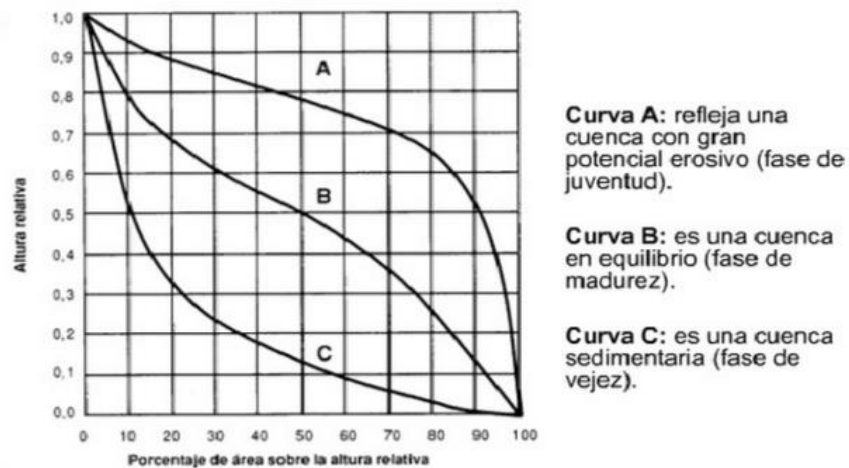


Figura 69 Diagrama comparativo de curvas hipsométricas

La captación de la información hipsométricas constituye el paso inicial en el proceso de construcción del DEM, e incluye la fase de transformación de la realidad geográfica a la estructura digital de datos. Los métodos para la recopilación de datos de altitud pueden

dividirse en directos e indirectos, siendo los primeros medidos directamente sobre el terreno real, por otra parte los indirectos emplean documentos analógicos o digitales.

B.3. Imágenes Satelitales Landsat 8

El satélite Landsat 8 fue lanzado el 11 de Febrero de 2013 , y se encuentra orbitando a una distancia de 701 km sobre la superficie terrestre, y pasa por un mismo sitio del planeta cada 16 días; al día recopila un total de 700 capturas, las cuales poseen un cubrimiento de 185 x 180 km.

Los instrumentos principales de Landsat 8 son el *Operational Land Imager* (OLI) y el *Thermal Infrared Sensor* (TIRS). El sensor OLI recoge imágenes en nueve bandas espectrales con resolución de 30 m a excepción de la imagen pancromática con 15 m, siendo esta última la que plasma todas las longitudes de onda del espectro visible y produce una imagen realista de la escena. El sensor OLI permite distinguir áreas urbanas, cultivadas, bosques, usos de suelo, entre otros.

El sensor TIRS brinda escenas térmicas de la tierra, por medio de dos bandas de infrarrojo de onda larga con una resolución es de 100 m pero ajustable a 30 m por fusión con las imágenes OLI.

B.3.1 Respuestas y bandas espectrales

Cada sensor de Landsat 8 capta imágenes de acuerdo a bandas espectrales, y según las características de cada banda, es posible el reconocimiento de determinados objetos de la superficie en función al comportamiento espectral de los mismos.

Las diferentes coberturas terrestres responden de modo distinto en términos de reflectividad o albedo de la luz solar, a este comportamiento propio de reflectividad según longitud de onda de cada objeto se le denomina *Firma Espectral* y se define como el comportamiento diferencial que presenta la radiación reflejada (reflectancia) desde algún tipo de superficie

u objeto terrestre en los distintos rangos del espectro electromagnético. La firma espectral de variadas coberturas se puede observar en la Figura 70.

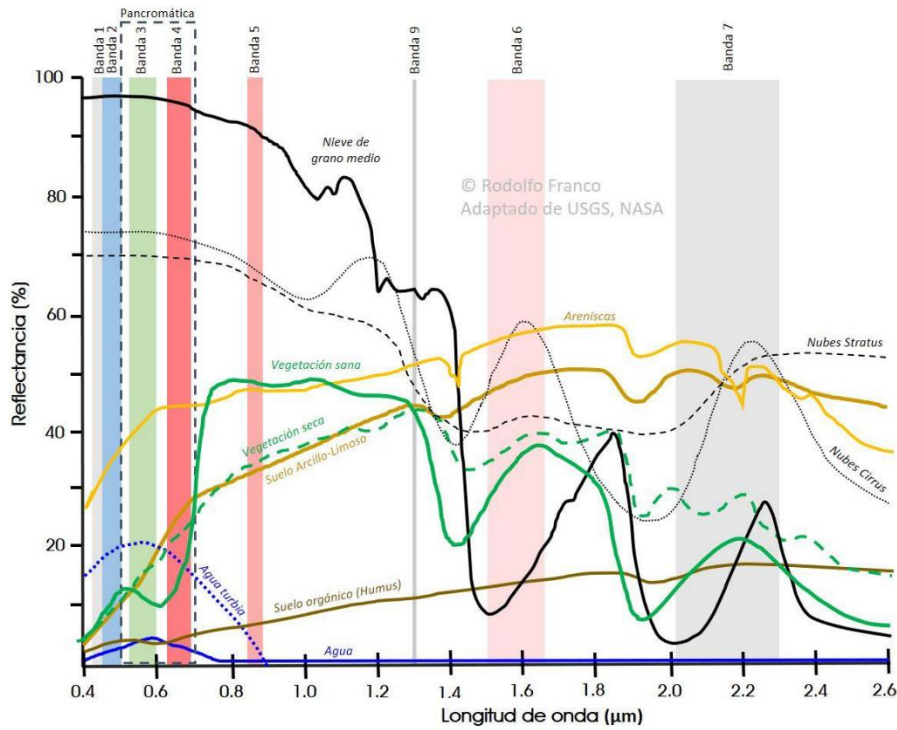


Figura 70 Respuesta espectral de algunas coberturas en las bandas del sensor OLI

La Tabla 27 señala en detalle las bandas espectrales de los sensores Landsat 8 OLI-TIRS, indicando el nombre de banda, rango de ancho de banda en nm y la resolución espectral en metros.

Tabla 27 Bandas espectrales Landsat 8 OLI-TIRS

Número	Bandas Espectrales	Rango ancho banda (nm)	Resolución (m)
B1	Coastal Aerosol	300	30
B2	Azul	450 - 510	30
B3	Verde	530 - 590	30
B4	Rojo	640 - 670	30
B5	NIR	850 - 880	30
B6	SWIR 1	1570 - 1650	30
B7	SWIR 2	2110 - 2290	30
B8	Pancromática	500 - 680	15
B9	Cirrus	1360 - 1380	30
B10	IR térmico 1	10600 - 11190	100
B11	IR térmico 2	11500 - 12510	100

El análisis e interpretación de los datos adquiridos por el sensor OLI, precisa a priori mediciones radiométricas en laboratorio o campo (Pinilla Ruiz 1995). Además, los sensores no poseen bandas para todo el intervalo de reflectancia, por lo cual la certeza del reconocimiento del tipo de superficie solo es posible con la previa determinación experimental de las firmas espectrales.

Es importante dar cuenta que todas las bandas espectrales de los sensores OLI-TIRS, están acotadas en un rango del espectro electromagnético, por lo cual las reflectancias captadas se reúnen en intervalo de longitudes y son clasificadas según al nombre de la banda.

B.3.2 Cuadrícula Landsat

Los satélites Landsat usan una cuadrícula mundial de referencia denominada *Worldwide Reference System* (WRS), de esta existen dos versiones, WRS-1 y WRS-2, siendo esta última la utilizada por Landsat 8.

La cuadrícula cubre el globo totalmente en su longitud, entre los 82,6° y -86,2° de latitud, y fue construida de acuerdo al recorrido que hace el satélite sobre el planeta, por lo que posee una configuración ascendente (o nocturna) y otra descendente (o diurna).

En el sistema WRS cada escena capturada es denotada por un número específico de columna y fila dentro de la cuadrícula. La Figura 71 se observan los cuadrantes correspondientes para la captura completa de Chile continental durante la configuración ascendente.

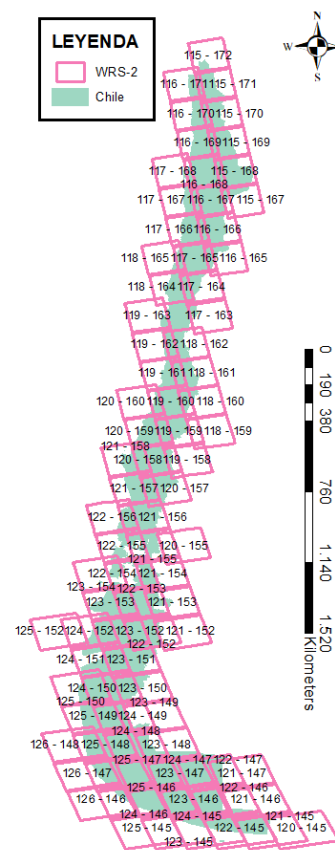


Figura 71 Captaciones WRS-2 para Chile