



**UNIVERSIDAD DE CHILE**  
**Facultad de Arquitectura y Urbanismo**  
**Escuela de Pregrado**  
**Carrera de Geografía**

**ESTIMACIÓN DE LA EROSIÓN HÍDRICA EN ZONA SEMIÁRIDA DEL NORTE  
CHILENO MEDIANTE LA ECUACIÓN UNIVERSAL DE PÉRDIDA DE SUELO (USLE):  
EL CASO DE PUNITAQUI (IV REGIÓN DE COQUIMBO)**

Memoria para optar al título profesional de Geógrafo

DIEGO IGNACIO ESCOBAR VALDEBENITO

Profesor guía: Pablo Sarricolea Espinoza

SANTIAGO-CHILE

2019

## **Agradecimientos:**

*Este trabajo va dedicado a mis padres por enseñarme el valor de la educación.*

*Al profesor Pablo Sarricolea por ayudarme a sacar adelante esta tarea (y por su infinita paciencia).*

*Y Bueno...Al Rock and Roll, por ser un leal compañero todos los días. Con esto me despido, adiós FAU.*

## Contenidos

1. Presentación.....	7
1.1. Planteamiento del Problema:.....	7
1.2. Marco teórico.....	9
1.2.1. Concepto de erosión.....	9
1.2.2. Erosión Hídrica.....	10
1.2.3. Tipos y formas de erosión hídrica.....	11
1.2.4. Factores de erosión hídrica.....	17
1.2.5. Modelización de la erosión mediante teledetección y Sistemas de Información Geográfica.....	21
1.2.6. Erosión en Chile (estudios destacados).....	24
1.2.7. Causas de la erosión en la región de Coquimbo.....	26
1.3. Objetivos.....	31
1.3.1. Objetivo general.....	31
1.3.2. Objetivos específicos.....	31
2. Materiales y métodos.....	32
2.1. Antecedentes generales:.....	32
2.1.1. Área de Estudio.....	32
2.1.2. Macro unidades morfológicas, clima e hidrografía.....	33
2.1.3. Características climáticas e hidrológicas.....	36
2.1.4. Principales actividades económicas, uso de suelo y vegetación.....	39
2.2. Modelo y fuentes de datos empleados.....	43
2.3. Cálculo de los factores del modelo USLE:.....	46
2.3.1. Factor erosividad de la lluvia (Factor R).....	46
2.3.2. Cálculo del factor de erodabilidad del suelo (Factor K).....	50
2.3.3. Factor longitud y grado de pendiente (factor LS):.....	52
2.3.4. Cálculo del factor de cobertura de vegetación (Factor C).....	56
2.3.5. Cálculo de la erosión hídrica actual y potencial en Punitaqui.....	58
3. Resultados.....	60
3.1. Análisis de los parámetros obtenidos.....	60
3.1.1. Factor R.....	60
3.1.2. Factor K.....	62
3.1.3. Factor LS.....	65

3.1.4. Factor C.....	67
3.2. Erosión Hídrica en Punitaqui .....	68
4. Discusiones .....	78
5. Conclusiones.....	82
Bibliografía.....	85
Anexos .....	92

### Índice de Figuras

Figura 1.1 Etapas de la erosión .....	10
Figura 1.2 Procesos desencadenados a partir de la salpicadura .....	12
Figura 1.3 Muestra de erosión laminar.....	13
Figura 1.4 Muestra de erosión en surcos.....	14
Figura 1.5 Muestra de erosión en cárcavas .....	15
Figura 1.6 Muestra de erosión en márgenes.....	16
Figura 1.7 Muestra de erosión en fondos de ríos .....	16
Figura 1.8 Tipos de erosión hídrica.....	16
Figura 1.9 Triangulo textural.....	18
Figura 1.10 Triangulo de erodabilidad.....	18
Figura 1.11 Impacto atribuible a la agricultura.....	27
Figura 1.12 Impacto atribuible a pastoreo .....	27
Figura 2.1 Contexto Regional Comuna de Punitaqui.....	32
Figura 2.2 Macro unidades Región de Coquimbo .....	34
Figura 2.3 Topografía en Punitaqui.....	35
Figura 2.4 Contexto climático según los climas de Koppen-Geiger (1900).....	36
Figura 2.5 Precipitación media anual en Punitaqui, periodo 2000-2017 .....	37
Figura 2.6 Comportamiento de la precipitación media mensual .....	37
Figura 2.7 Contexto de Punitaqui en red hidrográfica de la provincia de Limarí: .....	38
Figura 2.8 Superficie cultivada por sector agrícola.....	40
Figura 2.9 Usos vegetacionales y de suelo en Punitaqui: .....	41
Figura 2.10 Formaciones matorrales en Punitaqui.....	42
Figura 2.11 Ejemplo de estimación de K en nomograma .....	51
Figura 3.1 Factor R de erosividad de las precipitaciones en Punitaqui (2000-2017) .....	60
Figura 3.2 Clases texturales en Punitaqui:.....	63
Figura 3.3 Factor K de erodabilidad del suelo en Punitaqui .....	64
Figura 3.4 Factor LS de topografía en Punitaqui.....	66
Figura 3.5 Factor C de cobertura vegetal en Punitaqui .....	67
Figura 3.6 Erosión Hídrica Actual en Punitaqui.....	69
Figura 3.7 Porcentajes de erosión hídrica actual en Punitaqui, por categorías .....	70
Figura 3.8 Erosión Potencial en Punitaqui .....	72
Figura 3.9 Porcentajes de erosión hídrica actual en Punitaqui, por categorías .....	73
Figura 3.10 Pérdidas de suelo bajo óptica de conservación (con vegetación) .....	74

Figura 3.11 Porcentajes erosión según óptica de conservación (con vegetación).....	75
Figura 3.12 Pérdidas de suelo bajo óptica de conservación (sin vegetación).....	76
Figura 3.13 Porcentajes de erosión según óptica de conservación (sin vegetación).....	77

### Índice de Tablas

Tabla 1.1 Tipos de modelos.....	22
Tabla 1.2 Superficie de erosión en categorías.....	24
Tabla 1.3 Superficie de erosión actual en categorías, nivel regional.....	25
Tabla 1.4 Superficie de erosión potencial en categorías, nivel regional.....	26
Tabla 1.5 Superficie de erosión actual en la provincia de Limarí.....	29
Tabla 1.6 Superficie de erosión potencial en la provincia de Limarí:.....	30
Tabla 2.1 Rango de pendiente según umbrales morfo dinámicos.....	35
Tabla 2.2 Clasificación del Factor R.....	50
Tabla 2.3 Clasificación del índice Modificado de Fournier.....	50
Tabla 2.4 Factor K de erodabilidad del suelo según textura.....	52
Tabla 2.5 Clasificación de la erosión hídrica según pérdidas de suelo en ton/ha/año.....	59
Tabla 2.6 Clasificación de las pérdidas de suelo según prácticas de conservación.....	59
Tabla 3.1 Resultados MFI y Factor R por estación pluviométrica ficticia.....	61
Tabla 3.2 Valores de K por clase textural, comuna de Punitaqui.....	63
Tabla 3.3 Superficie afectada por Erosión Hídrica Actual en Punitaqui.....	70
Tabla 3.4 Superficie afectada por Erosión Hídrica Potencial en Punitaqui.....	73

### Índice de Anexos

Anexo 1 Síntesis de Modelo USLE aplicado en Punitaqui (Diagrama de procesos).....	92
Anexo 2 Coordenadas estaciones pluviométricas ficticias.....	93
Anexo 3. Mapa de estaciones pluviométricas ficticias.....	94
Anexo 4 Modelo digital de elevación.....	95
Anexo 5: Mapa de pendientes.....	96
Anexo 6 Mapa de dirección de flujo.....	97
Anexo 7 Mapa de acumulación de flujo.....	98
Anexo 8 Índice de Diferencia Normalizada de Vegetación.....	99

## Resumen

La erosión es un fenómeno de desprendimiento del suelo por acción de agentes como el agua y el viento. Sus daños se asocian generalmente a la agricultura en las áreas tropicales y semiáridas, y conlleva efectos a largo plazo sobre la productividad y sostenibilidad en los cultivos. La erosión hídrica hace mención a las pérdidas de suelo que se producen por el recorrido del agua en la superficie y generalmente se traduce en 4 tipos: laminar, surcos, cárcavas y en bancos aluviales. En el estudio de este proceso, que puede tener causas naturales así como antrópicas, se han desarrollado una serie de modelos, muchos de ellos de origen estadounidense, que a partir de parámetros interrelacionados pueden calcular las pérdidas de suelo que se presentan en un área dada. Uno de los más populares consiste en la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE, por su acrónimo en inglés) (Wischmeier & Smith, 1978), que es un modelo empírico de tipo caja gris que estima las pérdidas de suelo en sus formas laminar y de surcos en base a la multiplicación de 5 factores: erosividad de las precipitaciones (R), erodabilidad del suelo (K), longitud y gradiente de pendiente (LS), manejo de cultivos (C) y prácticas de control de erosión (P). Aunque la ecuación y sus factores fueron diseñados en base a las condiciones del este de las montañas rocosas de EE. UU., es frecuente su utilización u/o adaptación a otras zonas geográficas.

La combinación entre modelos empíricos y técnicas de teledetección ha permitido generar datos cartográficos de una forma más expedita que en el pasado. Utilizando los Sistemas Geográficos de Información como herramientas de procesamiento de datos satelitales, es posible recopilar y generar información de la erosión en una zona a escala espacial y temporal. Aun así, un problema recurrente sigue siendo la disponibilidad de datos, como por ejemplo los que se vinculan a elementos climáticos, propiedades de suelos y los que cuentan con el detalle de manejo de cultivos o las prácticas anti erosivas en las zonas de actividades agropecuarias. Por lo tanto, en el desarrollo del modelo USLE mediante sistemas de información geográfica es preciso adecuar el cálculo de ciertos parámetros de la ecuación para que representen los elementos del paisaje de la forma más consistente posible con el concepto original del modelo.

El propósito de esta investigación se enfoca en estimar las pérdidas por erosión en una zona del semiárido chileno mediante el modelo USLE, específicamente, en la comuna de Punitaqui, ubicada en la IV Región de Coquimbo. A partir de los resultados del modelo se intenta determinar las localidades de la comuna donde el fenómeno erosivo afecta de mayor manera y a la vez se busca caracterizar las pérdidas de suelo en la zona desde la óptica de la conservación del recurso.

# 1. Presentación

## 1.1. Planteamiento del Problema:

La erosión es un fenómeno natural o antrópico de permanente transformación de la superficie del suelo, ligado fundamentalmente a la interacción entre dicho elemento con el agua o el viento como principales factores degradantes. El fenómeno involucra daños de alta relevancia a los recursos edáficos de un país y de un territorio en general, lo cual hace que deba ser abordado con las herramientas de conocimiento apropiadas, a fin de evitar la ejecución inadecuada de medidas que no logran controlar el proceso erosivo, y por el contrario, acentúan el problema y sus consecuencias, las cuales están ligadas principalmente con la economía, la sociedad y el medio ambiente del territorio de un país. (Pizarro *et al*, 2009).

En Chile, la degradación de las tierras adquiere una alta importancia en zonas áridas y semiáridas, dada la fragilidad de estos ecosistemas, en donde predominan condiciones de cobertura vegetal reducida o casi ausente. Este hecho sumado a la ocurrencia de eventos de precipitación escasos pero de alta intensidad conduce irremediablemente a procesos de desertificación, fenómeno que se ha constituido como uno de los problemas socioeconómicos-ambientales más serios del país (Pizarro *et al*, 2010)

En este contexto, la IV Región de Coquimbo es una de las zonas del país que presenta la situación más crítica, puesto que gran parte de su superficie esta sometida a algún grado de erosión. Esto se debe a las precipitaciones torrenciales que a pesar de ser escasas, arrastran consigo significativas porciones de suelo con buenas condiciones de fertilidad. (Benedetti y Pizarro, 2006, citados por Pizarro, 2010). Por otra parte, hay que considerar los efectos antrópicos de la erosión, que en la zona están influenciados por la deforestación, el sobrepastoreo, la expansión urbana y a malas prácticas silvoagrícolas a lo largo del tiempo (Flores *et al*, 2010).

La Región en cuestión esta compuesta por las provincias de Choapa, Elqui y Limarí que adquieren el nombre de sus respectivos ríos principales. De entre las 15 comunas que alberga, la comuna de Punitaqui (ubicada en la provincia de Limarí) es junto con las comunas de Canela y La Higuera, la que presenta la mayor proporción de suelos erosionados. De por si la provincia de Limarí se destaca por su clima semiárido templado, con precipitaciones mayoritariamente invernales y con altas temperaturas en gran parte del año, lo que determina que sea una zona principalmente seca.

La falta de información cuantitativa sobre el tema de la erosión, es un problema evidente y ello es más explícito en zonas áridas y semiáridas, por lo que resulta de vital importancia el contar con herramientas matemáticas y/o computacionales que permitan estimar las tasas de erosión, con el propósito de facilitar la toma de decisiones técnicas y con ello conseguir un manejo sustentable del recurso suelo en aquellas zonas (Pizarro *et al*, 2010).

En este respecto, los modelos empíricos son herramientas consolidadas en el estudio de los recursos naturales, dado que son fácilmente formulables, con relaciones costo-beneficio aceptables (Ibañez *et al*, 1995). Si bien populares, el uso de estos modelos está limitado a las fuentes de datos disponibles, las que no siempre son asequibles por el usuario, lo que implica que este debe realizar suposiciones irreales sobre el medio físico ya que generalmente se ignora la heterogeneidad espacial y temporal que existe dentro de la unidad de estudio como por ejemplo la distribución de la precipitación y los tipos de suelo así como los manejos de cultivo o las prácticas de control de la erosión. (Alatorre & Beguería, 2009).

Entre los modelos de erosión hídrica más comúnmente utilizados se incluye la Ecuación Universal Pérdida de Suelo (Wischmeier & Smith, 1978), mejor conocida como USLE por su acrónimo en inglés. Este modelo viene representado por una ecuación paramétrica, donde se multiplican 5 parámetros que vienen a representar los condicionantes de la erosión hídrica: la erosividad de las precipitaciones (R), la erodabilidad del suelo (K), la topografía (LS), el manejo de cultivos (C) y las prácticas de control de erosión (P).

La ecuación está pensada para medir la cantidad de suelo removido por efecto de la erosión laminar y de surcos, que son dos manifestaciones de la erosión hídrica. Como señala Morgan (1997) los modelos empíricos como USLE (que es específicamente un modelo de tipo caja gris), tienen una gran limitación derivada del hecho de que las ecuaciones no pueden extrapolarse con exactitud más allá del campo de valores que las definieron, ya sea a sucesos más extremos o a otras zonas geográficas. Dado que gran parte de las fórmulas para obtener los parámetros están basadas en condiciones de origen estadounidense (la zona este de las montañas rocosas de EE.UU), la aplicación de la ecuación en otras áreas de estudio implica adecuar el cálculo de ciertos parámetros según las condiciones de la zona que se busca modelar.

En la actualidad varios de los modelos de representación espacial pueden desarrollarse en Sistemas Geográficos de Información (SIG). Según menciona Ibañez *et al* (1995) la compatibilización e incorporación de datos cuantitativos a los SIG permite construir bases de datos georreferenciadas con enormes posibilidades para el tratamiento de la variabilidad espacial. El Modelo USLE ejecutado en un SIG permite arrojar cartografías de erosión que pueden reflejar la erosión actual en una determinada zona, así como la erosión potencial en el caso de desaparecer las condiciones de manejo de cultivo y las prácticas de control de erosión (Castro, 2013).

En base a estos antecedentes, el propósito de la investigación se centra en estimar la erosión actual y potencial en la comuna de Punitaqui y sus localidades, mediante el modelo USLE para el marco de tiempo 2000-2017. Para ello, se generaron los factores de cálculo de cada uno de los cinco parámetros, los que en formato raster, se multiplicaron y devendrán en dos resultados: una cartografía de erosión actual y erosión potencial. Se generan también dos cartografías similares a las anteriores con la diferencia que denotarán la erosión desde la óptica de la conservación de suelos, caracterizando las pérdidas tolerables y no tolerables del recurso con o sin presencia de vegetación.



## 1.2. Marco teórico

### 1.2.1. Concepto de erosión

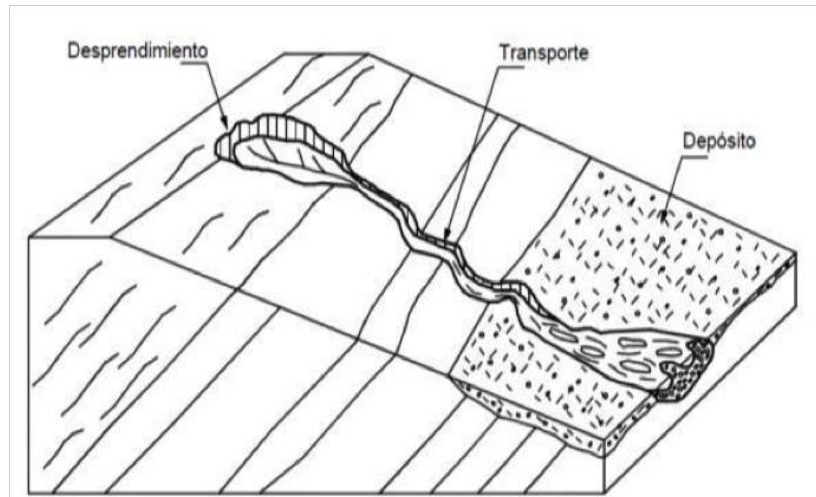
La erosión puede ser entendida como un proceso de desprendimiento y arrastre acelerado de las partículas de suelo causado por agentes como el agua y el viento (Suarez, 1980 citado por León, 2001). Kirby (1980) señala que la erosión de suelo es una característica natural en el desarrollo del paisaje pero que solo en algunas partes del mundo se constituye como el proceso más importante de degradación, también habiendo otros procesos de remoción de sedimentos como los movimientos de masa y la disolución. Según León (2001) hay dos tipos básicos de erosión: la geológica o natural, y la antrópica acelerada. La primera se produce normalmente sin la acción del hombre, estando por tanto fuera de su control y es tan lenta que pasa inadvertida y contribuye de cierto modo a la formación del relieve mismo y a la meteorización de las rocas. De la erosión antrópica en tanto se puede decir que es consecuencia o ha sido mediada por el humano al destruir la vegetación protectora e introducir diversos usos de suelo lo que rompe el equilibrio natural.

Para Año y Peris (2003) citados por Pizarro *et al* (2009) el fenómeno es la manifestación fenomenológica de una multitud de procesos que dan lugar a la pérdida del recurso suelo, y que pueden englobarse en tres fases diferentes que vienen a constituir la mecánica de la erosión: desprendimiento, transporte y depositación (**Figura 1.1.**). Tanto el desprendimiento como el transporte son causados por agentes como el agua y el viento. En el momento en que ya no hay suficiente energía por parte de estos para seguir transportando sedimentos es que ocurre la tercera fase conocida como depositación.

Sobre esto Alatorre & Beguería (2009) señalan que en un sentido geomorfológico los términos de erosión, remoción y transporte se utilizan habitualmente en referencia a una unidad paisajística concreta, como por ejemplo una ladera o una cuenca. Cuando el transporte se produce más allá de donde ha tenido lugar la erosión, es común no utilizar este termino y pasar a hablar de producción de sedimento. Los agentes de transporte comprenden los que actúan superficialmente y contribuyen a remover un espesor relativamente uniforme del suelo, y aquellos otros cuya acción se concentra en cauces. En el primer grupo podemos incluir a la salpicadura, la escorrentía superficial (también conocida como flujo laminar) y el viento; en el segundo grupo se encuentran los flujos de agua actuando en pequeños cauces conocidos como regueros, los que pueden dar paso a cárcavas y barrancos (Morgan, 1997).

La severidad de la erosión depende de la cantidad de material desprendido y la capacidad de los agentes erosivos para transportarlo, por tanto la erosión puede estar limitada por el desprendimiento (cuando la capacidad de transporte de los agentes es superior a la cantidad de material desprendido) o limitada por el transporte (cuando el material desprendido es mayor que el que puede ser transportado). (Morgan, 1997).

Figura 1.1 Etapas de la erosión



Fuente: Suarez (2001) en Valdez (2014)

Físicamente hablando, la energía necesaria para la erosión se produce en dos formas: potencial y cinética, donde la primera resulta de la diferencia de altura de un cuerpo con respecto a otro. Este tipo de energía luego deviene en cinética que en su mayor parte se disipa en su rozamiento con la superficie, de tal manera que solo entre un 3 y 4 por ciento de la energía de la escorrentía se consume en erosión (Pearce, 1976, citado por Morgan 1997).

Uno de los efectos negativos más importantes de la erosión se presenta en los terrenos agrícolas donde la redistribución y pérdida de suelo, así como la ruptura de la estructura y el descenso del contenido de materia orgánica y nutrientes hace que se reduzca la profundidad cultivable y la fertilidad del suelo, promoviendo la dependencia de los fertilizantes e incluso el abandono de terrenos agrícolas (Alatorre & Beguería, 2009).

### 1.2.2. Erosión Hídrica

El fenómeno de la erosión hídrica está estrechamente relacionado con las rutas que sigue el agua en su paso a través de la cobertura vegetal y su movimiento sobre la superficie del suelo, es decir el escurrimiento superficial, (Morgan, 1997). Mintegui & López (1990) citados por Pizarro *et al* (2009) definen este tipo de erosión como el proceso de disgregación de las partículas del suelo por la acción del agua, lo que culmina con el depósito de los materiales transportados por la corriente, en áreas de sedimentación.

La erosión hídrica comienza cuando las gotas de lluvia impactan la superficie con una energía suficiente como para desplazar partículas de material sin consolidar, lo que se conoce comúnmente como “salpicadura” (SUDAS, 2006, citado por Pizarro *et al*, 2009). Como define en forma concreta Pino (2008), el desprendimiento de una partícula de la masa del suelo se produce cuando las fuerzas ejercidas por el flujo son superiores a las fuerzas que mantienen la partícula unida al resto de la masa unitaria, es decir, se sobrepasa un esfuerzo crítico de corte, o bien, la fuerza por unidad de área requerida para vencer la resistencia de los agregados.

Como consecuencia de la desagregación inicial que se produce en la fase anterior por efecto de la salpicadura, en el suelo se produce un sello superficial que disminuye radicalmente la capacidad de infiltración (Duley, 1987; Ellison, 1947 citados por Yapur, 2010). En el momento en que la precipitación supera a la tasa de infiltración del agua en el suelo, se produce la retención y detención superficial, y posteriormente, el escurrimiento superficial del agua que no infiltra. La escorrentía superficial se convierte por tanto en un agente de transporte, cuya capacidad es proporcional al caudal y a la velocidad del flujo. (Cisneros *et al*, 2012).

Cuando la velocidad de la escorrentía llega a un umbral mínimo, en el cual las partículas removidas en las fases previas no pueden mantenerse dentro del flujo es que ocurre la sedimentación o depositación (Cisneros *et al*, 2012).

### 1.2.3. Tipos de erosión hídrica

Entre las manifestaciones paisaje más comunes de la erosión hídrica en el paisaje, están la erosión por salpicadura, la erosión laminar, la erosión por surcos, la erosión en cárcavas y la erosión en bancos aluviales, formas que son descritas a continuación:

- Erosión por Salpicadura:

Se da como consecuencia del impacto directo de la gota de lluvia sobre el terreno. Se pueden producir pequeños cráteres de impacto, con liberación de partículas que se desplazan en un radio máximo de 150 cm. (Bienes, 2006).

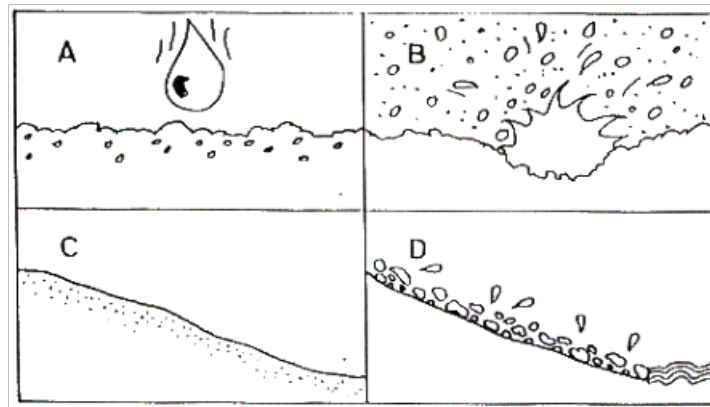
Morgan (1997) señala que la acción de las gotas de lluvia sobre las partículas de suelo se entiende fácilmente cuando se la considera como el “momento” de una gota que cae sobre una superficie en pendiente. La transferencia de este “momento” al suelo tiene dos efectos: primero, proporciona una fuerza de consolidación que compacta el suelo y segundo, produce una fuerza rompedora, ya que el agua se dispersa rápidamente y retorna al punto del impacto en chorros que fluyen lateralmente. La velocidad local de estos chorros es casi el doble que la del impacto de las gotas de lluvia (Huang *et al*, 1972 citados por Morgan, 1997), y es suficiente para proporcionar velocidad a algunas de las partículas del suelo,

lanzándolas a la atmósfera mezcladas con las minúsculas gotas de agua que se han formado por la ruptura de las gotas de lluvia contra el suelo (Mutchler y Young, 1975 citados por Morgan, 1997).

El efecto de consolidación que mejor se aprecia es la formación de una costra superficial (de pocos milímetros de espesor) que resulta de la reducción de poros por compactación del suelo y que tiene como efecto más importante la reducción de la capacidad de infiltración del suelo y por lo tanto la promoción de mayor escorrentía superficial. (Morgan 1997).

El proceso de la salpicadura puede graficarse de la siguiente forma (**Figura 1.2.**): Tras el impacto de la gota de lluvia (A), los agregados del suelo son desintegrados en partículas minúsculas (B), que contribuyen a sellar los poros formando una selladura superficial (C). Luego el agua que escurre transporta partículas de suelo que son depositadas en lugares más bajos, cuando la velocidad de escurrimiento se reduce (D).

**Figura 1.2** Procesos desencadenados a partir de la salpicadura



Fuente: Derpsch *et al* (1991) en Bienes (2006)

- Erosión laminar:

La erosión laminar (**Figura 1.3.**) consiste en la remoción de delgadas capas de suelo por efecto del agua que discurre por terrenos uniformes y con poca pendiente (Bascañan, 2010). Bienes (2006) describe que el agua circula a lo largo de la pendiente como una lámina (flujo laminar), erosionando el suelo por capas sucesivas. Este flujo nunca fluye de forma continua sobre la superficie, sino que se presenta a modo de oleadas o como un flujo subdividido detenido por pequeños obstáculos y que cambia constantemente de dirección, actuando a veces con mas intensidad sobre una zona respecto a otra.

**Figura 1.3 Muestra de erosión laminar**



Fuente: Cisneros *et al* (2012)

Sobre esto Morgan (1997) añade que el flujo superficial se produce en las laderas después de una tormenta cuando se supera la capacidad de almacenaje en las depresiones de la superficie y cuando ya sea por una lluvia prolongada o por lluvias de intensidad superior a la capacidad de infiltración del suelo, se supera su capacidad de retención.

Las características hidráulicas del flujo laminar están definidas por sus números de Reynolds y de Froude. El primero es un índice de turbulencia del flujo y en el que dependiendo de los valores se puede hablar de régimen laminar o turbulento. En el régimen laminar, el flujo se mueve en línea recta, con velocidad uniforme y no hay mezcla entre las capas que lo componen, en tanto en un régimen turbulento hay un patrón complicado de remolinos, produciéndose fluctuaciones considerables en la velocidad y un continuo intercambio de agua entre las capas. Se asume que mientras mayor sea la turbulencia mayor es el poder erosivo del flujo (Morgan, 1997)

Respecto al índice de Froude este es un índice de formación de olas en el flujo. Cuando este es menor a 1 denota que no se forman olas y el agua discurre de forma tranquila (flujo subcrítico). Cuando el índice es mayor que 1 significa flujos caracterizados por olas de mayor poder erosivo (flujos rápidos o supercríticos).

La erosión laminar es un proceso poco percibido por los agricultores pero puede significar gran daño a las tierras debido al empobrecimiento en elementos nutrientes y al descenso de la capacidad de almacenamiento de agua (Bascuñan, 2010).

- Erosión por surcos:

Tipo de erosión que se produce cuando se incrementan los caudales, la altura del agua y su velocidad, mutando de un flujo laminar a uno concentrado, definido por la microtopografía del lote suelo. Dicho de otro modo, cuando la pendiente de un terreno experimenta irregularidades de forma, longitud e inclinación, la escorrentía se concentra en algunos sitios hasta adquirir volumen y velocidad suficientes para hacer cortes y formar surcos (Suarez, 1980 en Farfán, 2002 citado por Pizarro *et al* 2009). Ineter *et al* (2005) citado por Valdez (2014) señala que la erosión por surcos es la pérdida de suelo por agua de lluvia cuando esta se ha concentrado en pequeñas depresiones naturales, y empieza a desplazarse ladera abajo arrastrando el suelo, formando zanjas con profundidades de hasta 50 cm (**Figura 1.4.**).

Morgan (1997) señala que la evolución de un flujo superficial a uno concentrado en surcos pasa por cuatro etapas: flujo no concentrado en cauces, flujo superficial con flujo concentrado en cauces, micro canales sin cabecera y micro canales con cabecera.

El inicio de los surcos (también conocidos como regueros) se relaciona con la superación de una velocidad cortante crítica de la escorrentía (Morgan, 1997). Se debe mencionar igualmente que los surcos se inician a una distancia crítica ladera abajo, donde el flujo de escorrentía comienza a canalizarse. Esto significa que a partir del flujo principal pendiente abajo, se desarrollan cauces de flujos secundarios con una componente lateral. Cuando se produce la convergencia de estos, el aumento de la descarga intensifica el movimiento de las partículas abriéndose pequeños canales o zanjas por abrasión. (Morgan 1997).

**Figura 1.4 Muestra de erosión en surcos**



Fuente: (Bienes, 2006)

- Erosión en cárcavas:

Comúnmente se suele considerar a las cárcavas como la evolución de los surcos, aunque en realidad es un proceso más complejo (**Figura 1.5**). Como describe Morgan (1997) esta forma de erosión se inicia cuando se generan pequeñas depresiones en la ladera como resultado de un debilitamiento localizado de la cobertura vegetal.

Como describe Cisneros *et al* (2012), la evolución de las cárcavas comienza con un pequeño salto hidráulico que puede ocasionarse en un quiebre de pendiente y que produce una cabecera de corte o abarrancamiento que avanza en forma retrocedente, es decir en dirección contraria al escurrimiento.

Explicado de otra manera, se puede decir que la erosión se concentra en la cabecera de la depresión, donde forma escarpes casi verticales en los que se produce flujo supercrítico. La mayor parte de la erosión está asociada a la abrasión de la base del escarpe, que origina una profundización del cauce y un socavamiento del muro de la cabecera, llegando a derrumbarse y retrocediendo el escarpe pendiente arriba.

**Figura 1.5 Muestra de erosión en cárcavas**



Fuente: Pizarro *et al* (2009)

- Erosión en bancos aluviales:

La erosión en bancos aluviales, también conocida como erosión de cursos permanentes se produce a partir de los procesos erosivos que se generan el lecho de los barrancos o cárcavas (SUDAS, 2006 citado por Pizarro *et al* 2009). Este tipo de erosión engloba la degradación que ocurre en los márgenes y fondos de ríos (Cisneros *et al*, 2012).

La erosión de márgenes se produce en el pie del río, debido de la acción erosiva de la corriente que desestabiliza la base y produce el desmoronamiento del resto de la margen, de modo similar a lo que ocurre en la erosión en cárcavas. La erosión en fondos de ríos por otra parte se relaciona a la pérdida del material de lecho a causa de los caudales erogados, a la carga de sedimentos y al tipo de material de fondo (Bienes, 2006). (**Figuras 1.6 y 1.7**):

**Figura 1.6** Muestra de erosión en márgenes



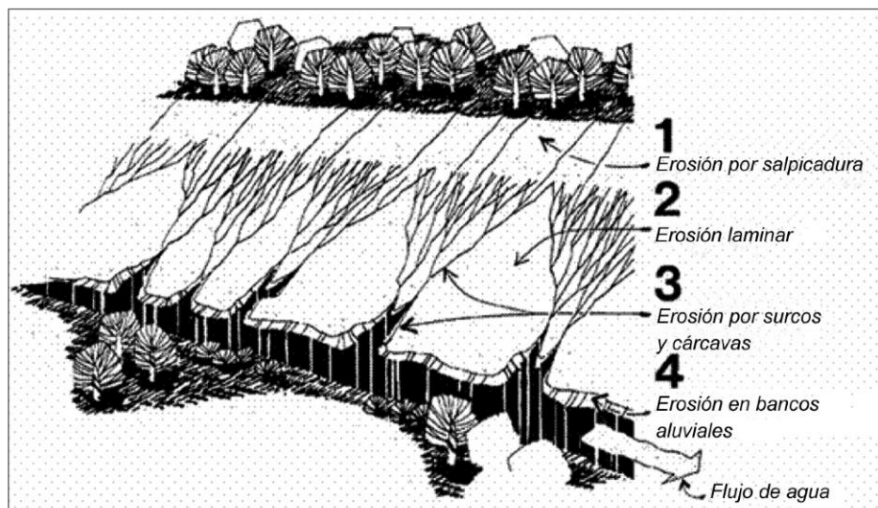
**Figura 1.7** Muestra de erosión en fondos de ríos



Fuente: Cisneros *et al* (2012)

El modelo de erosión USLE (descrito más adelante) solo calcula las pérdidas ocasionadas por la erosión de tipo laminar y de surcos. Todas la formas de erosión hídrica descritas previamente están resumidas en la siguiente imagen (**Figura 1.8**):

**Figura 1.8** Tipos de erosión hídrica



Fuente: USDA (2002) en Pizarro *et al* (2009)



#### 1.2.4. Factores de erosión hídrica

Se puede hacer incluso una descripción más específica sobre los elementos o factores que influyen en la erosión hídrica tales como el clima, las características de los suelos, la topografía y la vegetación. Estos factores son parámetros naturales que determinan la magnitud del fenómeno.

- Clima:

Las pérdidas de suelo están estrechamente relacionadas con la lluvia, en parte por el poder de desprendimiento del impacto de las gotas al golpear el suelo y en parte por la contribución de la lluvia a la escorrentía. Esta última contribuye en específico a la erosión por flujo laminar y en surcos, fenómenos para los que la intensidad de la precipitación se considera la característica más importante (Morgan, 1997)

Morgan (1997) señala que la erosión hídrica esta relacionada con dos tipos de lluvia, la tormenta intensa de corta duración que supera la capacidad de infiltración del suelo, y el aguacero de larga duración y baja intensidad que satura el suelo.

Con respecto a la intensidad de la lluvia, León (2001) menciona que es un factor primordial en el fenómeno de erosión puesto que la velocidad de infiltración del agua en el suelo es frecuentemente insuficiente cuando ésta cae con gran intensidad; es decir la llegada al suelo de una elevada cantidad de agua en un periodo corto de tiempo, produce rápidamente escorrentía, por lo que no sería tan importante el total de lluvia caída como la intensidad con que esta cae. De hecho en zonas semiáridas la mayor erosión por lluvia se produce cuando esta ocurre en tormentas violentas, aunque la cantidad de agua sea poca (León, 2001). Norton (1945) citado por Morgan (1997) destaca que si la intensidad de la lluvia es menor que la capacidad de infiltración del suelo, no se produce escorrentía superficial y la velocidad de infiltración es igual a la intensidad de la lluvia. Si esta es superior a la capacidad de infiltración, la velocidad de infiltración iguala a la capacidad de infiltración y el excedente forma escorrentía superficial.

También se puede señalar que la respuesta del suelo en términos de erosión a la recepción de la lluvia, podría estar determinada por las condiciones meteorológicas previas; es decir, dos eventos de lluvia que se sucedan sin haberse alcanzado a secar el suelo tras el primer evento puede llevar a que la segunda lluvia no infiltre, aumentando la escorrentía. (León, 2001).

- Características de los suelos:

La erodabilidad 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 (Morgan, 1997). León (2001) menciona que la textura y la estructura del suelo deben ser consideradas las características físicas más relevantes. Mientras que la textura de un suelo es la proporción relativa de los diferentes componentes minerales que posee éste (arena, limo, arcilla), la estructura hace mención la agrupación o unión de partículas individuales de suelo en forma agregados o terrones. (Bascañan, 2010)

Dentro de las características de los suelos que más incidencia tienen en la erodabilidad, la textura es muy relevante, puesto que condiciona la infiltración del agua en el suelo. Es sabido que los suelos con textura franco arenosos son buenos infiltradores y cuentan con una buena capacidad de retención del agua sobre todo si se les compara con aquellos de textura gruesa como los arcillosos. Como señalan Whithers & Vipond (1974) citados por León (2001), la capacidad de infiltración puede variar desde más de 200 mm h<sup>-1</sup> en suelos arenosos hasta menos de 5 mm h<sup>-1</sup> en suelos arcillosos, lo que en definitiva retarda la aparición de escorrentía superficial. En otro aspecto, se puede decir que los suelos con altos porcentajes de arcilla suelen ser bastante coherentes y tienen buena estabilidad estructural por lo que resisten de manera adecuada los impactos de las gotas de lluvia. En general existe consenso en que los suelos Franco y Franco limosos y también los arenosos poseen una mayor erodabilidad (Castro *et al*, 2016) (**Figuras 1.9 y 1.10**):

Figura 1.9 Triángulo textural

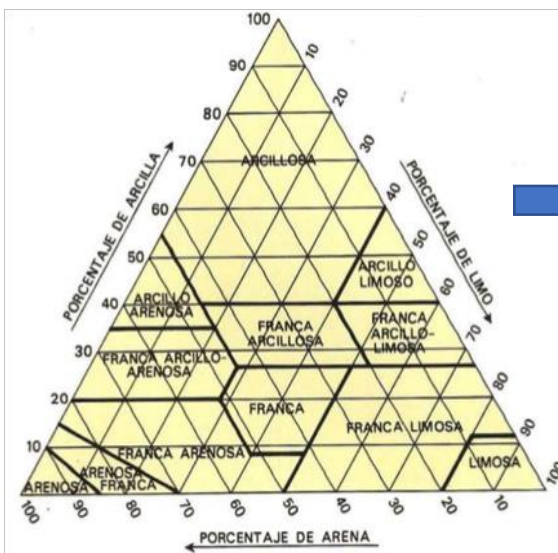
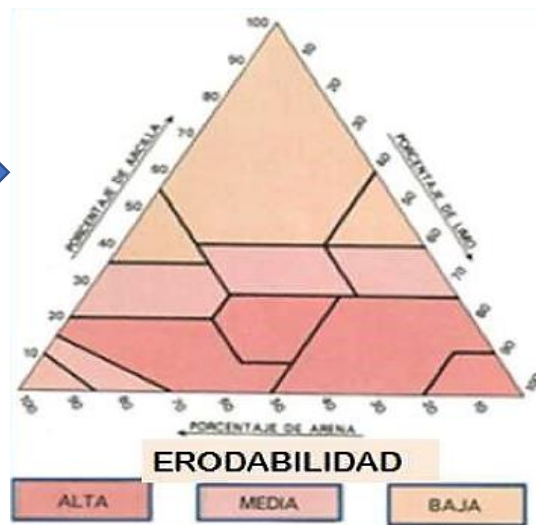


Figura 1.10 Triángulo de erodabilidad



Fuente: Castro *et al* (2016)

Aún así, debe señalarse que el comportamiento de la infiltración es bastante complejo en muchos suelos cuyo perfil está constituido por dos o más estratos con diferentes conductividades hidráulicas. La mayor parte de los suelos agrícolas tienen un estrato superficial afectado por el laboreo y un subsuelo no alterado. Las variaciones locales en las velocidades de infiltración pueden ser bastante altas debido a diferencias en la estructura, compactación, contenido de humedad inicial, forma del perfil del suelo, y la densidad de vegetación (Morgan, 1997)

En cuanto al papel que cumple la estructura, puede decirse que condiciona la velocidad y el tipo de movimiento vertical del agua en el perfil edáfico, por lo que se tiene que suelos con estructuras laminares propician movimientos de agua muy lentos, en tanto que estructuras columnares favorecen el rápido tránsito de esta (Henao, 1988, citado por León 2001).

- Topografía:

Bascuñán (2010) señala que las pérdidas de suelo por erosión hídrica crecen al aumentar la inclinación y la longitud de la pendiente como consecuencia del incremento de la velocidad y volumen de la escorrentía superficial, percibiéndose este suceso mucho más en las partes inferiores de las laderas. León (2001) afirma que, si la pendiente aumenta en sus variables de longitud e inclinación, la velocidad se duplica y por lo tanto la capacidad erosiva de la escorrentía se cuadruplica, así como lo hace su capacidad de transportar material.

Bennet (1965) citado por Pino (2008) menciona que en determinadas casos la variación del largo de la pendiente puede causar mayor efecto sobre las pérdidas de suelo que los cambios en su grado de inclinación, aunque esta última es igualmente importante ya que al irse inclinando el terreno, suelos sueltos y ligeros son más propensos al desprendimiento o desplazamiento del lugar que ocupan por efecto de la salpicadura, el escurrimiento superficial o la gravedad (Leon, 2001).

- Vegetación:

La vegetación actúa como una capa protectora o amortiguadora entre la atmósfera y el suelo. Los componentes aéreos, como hojas y talos, absorben parte de la energía de las gotas de lluvia, del agua en movimiento y del viento, de modo que su efecto es menor que si actuaran directamente sobre el suelo. Por otro lado los componentes subterráneos, como los sistemas radiculares, contribuyen a la resistencia mecánica del suelo (Morgan, 1997).

Evans (1980) señala que la escorrentía y la erosión disminuye en coberturas vegetadas (bosques, pastos). Esto se debe a que las tasas de infiltración a través de superficies vegetadas son altas en comparación a las que se dan en suelo desnudo ya que los suelos

vegetados a menudo tienen una mejor estructura y agregados más estables. En cuanto a las gotas de lluvia, parte de la energía de estas (o “momento” como fue descrito anteriormente) es disipada por la vegetación y no hay impacto directo sobre la superficie; el remanente fluye por tallos o troncos hacia debajo del suelo. Aún así, debe tenerse en cuenta que las gotas que interceptan hojas de plantas o árboles a menudo derivan en gotas de mayor tamaño una vez que caen al suelo, (debido a la coalescencia) y por lo tanto mayor es la superficie de suelo impactada por la gota.

La energía de la escorrentía también es disipada por la cubierta vegetal, puesto que esta aporta rugosidad al flujo y en consecuencia reduce su velocidad. Como señala Morgan (1997) el nivel de rugosidad de las diferentes formaciones vegetales depende, sobre todo, de la morfología y densidad de las plantas así como la altura de estas en relación a la profundidad o calado del flujo, es decir las plantas ofrecen escasa resistencia si la profundidad del flujo es alta.

Copeland (1965) citado por Evans (1980) señala que la escorrentía y la erosión aumentan rápidamente en suelos con menos del 70% de cubierta vegetal y que en regiones semi-áridas donde la vegetación a menudo anda por debajo del 20-30%, la escorrentía y la erosión están relacionadas a la proporción de suelo desnudo.

Además del efecto amortiguador contra el impacto directo de las gotas de lluvia, es de gran interés el efecto relacionado con el mejoramiento del proceso de infiltración. En tal sentido este proceso es favorecido por el crecimiento y desarrollo de las raíces a través del perfil del suelo, incrementando la porosidad y con ello la infiltración. (León, 2001).

### 1.2.5. Modelización de la Erosión Mediante Teledetección y Sistemas de Información Geográfica

El uso de modelos para la cuantificación de los procesos erosivos es un paso clave para la inclusión efectiva del fenómeno en la planificación territorial de un área. Para los intereses de la investigación, este apartado se centra en la descripción de los modelos de erosión y su aplicación mediante sistemas geográficos de información y de teledetección.

Un modelo es la representación de la relaciones entre algunas cantidades o cualidades definidas formalmente (generalmente en términos matemáticos o físicos) (Jeffers, 1982 citado por Ibáñez *et al*, 1995). Los modelos de erosión pueden ser representados en tres maneras: empíricos, conceptuales y físicos. Los primeros modelos en el ámbito de los recursos naturales fueron empíricos y se siguen ocupando actualmente, puesto que son de relativa fácil formulación, con relaciones costo-beneficio aceptables y frecuentemente, con un poder predictivo no menor al alcanzado por modelos más sofisticados como los modelos físicos. (Ibáñez *et al*, 1995).

Los modelos empíricos tienen una orientación fundamentalmente predictiva y son en general de tipo métrico-estático, es decir no ofrecen una visión dinámica del proceso, sino que se orientan a la predicción de valores promedio a largo plazo. Se sustentan sobretudo en la identificación de relaciones estadísticamente significativas entre ciertas variables que se asumen como esenciales y suficientes para modelar el comportamiento de un sistema (Morgan, 1986, citado por Ibáñez *et al*, 1995). Con tal motivo debe disponerse previamente de una base de datos de tamaño adecuado que pueda recopilarse por medio de instalaciones experimentales o por monitorización en campo. (Alatorre & Beguería, 2009).

Algunas de las características de los modelos se resumen a continuación en la **tabla 1.1**:

**Tabla 1.1 Tipos de modelos**

Tipo	Descripción
Físico	Modelos a escala reducida contruidos en laboratorio; necesitan asumir similitudes dinámicas entre el modelo y el mundo real
Analógico	Utiliza sistemas mecánicos o eléctricos análogos a los investigados; ej. El fluido eléctrico utilizado para simular los flujos de agua
Digital  (a) Con base física  (b) Estocástico  (c) Empírico	Utilizan ordenadores para procesar grandes cantidades de datos.  Describe los procesos incluidos en el modelo mediante ecuaciones matemáticas teniendo en cuenta las leyes de la conservación de la masa y de la energía.  Se basa en la generación de series sintéticas de datos a partir de datos simples existentes; es útil para generar secuencias de entrada para modelos de base física y empírica cuando los datos son disponibles solo para pequeños periodos de observación.  Basado en la identificación de relaciones estadísticas significativas entre las variables importantes consideradas cuando se dispone de una base de datos razonable. Se realizan tres tipos de análisis:  <i>de caja negra:</i> solo se estudian las entradas y salidas principales  <i>de caja gris:</i> se conocen algunos detalles de cómo funciona el sistema  <i>de caja blanca:</i> se conocen todos los detalles de cómo opera el sistema

Fuente: Gregory & Wailing (1973) en Morgan (1997)

Matemáticamente sencillos, estos modelos adquieren generalmente la forma de una ecuación paramétrica (suma y multiplicación de factores) como por ejemplo la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo (USLE, por su acrónimo en inglés). Si bien para la formulación de un modelo empírico se necesita una enorme cantidad de datos, posteriormente su aplicación tiene unos requerimientos de datos y computación menores a los de los modelos conceptuales y físicos.

Alatorre & Beguería (2009) remarcan una serie de desventajas asociadas en los modelos empíricos, como por ejemplo, el que se basan exclusivamente en relaciones estadísticas obtenidas a partir de cierta zona geográfica, lo que hace que su aplicación en otras áreas de estudio resulte difícil. También puede mencionarse que emplean suposiciones irreales sobre el medio físico, ya que generalmente se ignora la heterogeneidad espacial y temporal que existe dentro de la unidad de estudio, como por ejemplo la distribución de la precipitación y los tipos de suelo.

De cualquier forma, el uso cada vez más difundido de estos modelos se vincula al desarrollo de las tecnologías información geográfica como la teledetección y los sistemas de información geográfica (SIG's), que han ganado importancia debido a su capacidad conjunta para capturar y analizar información espacial y temporal.

La teledetección está definida como aquella técnica que permite obtener imágenes de la superficie terrestre desde sensores aéreos o espaciales en diferentes longitudes de onda (visible, infrarrojo, térmico, microondas, etc.). A partir de estas imágenes pueden obtenerse datos sobre coberturas de suelo, relieve, precipitaciones, etc., que funcionan como inputs para la modelización. Los sistemas de información geográfica en tanto son programas que almacenan, gestionan, manipulan y representan gráficamente datos con algún tipo de componente espacial, lo que implica que la información que se alberga está referenciada geográficamente ya sea se trate de mapas, estadísticas, o datos climáticos sobre un territorio concreto (Chuvieco,2010).

El uso de datos de procedencia satelital manipulados por medio de los SIG permite la realización de cartografías de erosión que pueden utilizarse de insumo para la predicción de las pérdidas de suelo; para la elaboración de planes de conservación del recurso; para la formulación de proyectos e inventarios de erosión; y para la ordenación territorial del recurso suelo. (Lal, 1994; citado por Pizarro *et al* 2009) (Alatorre & Beguería, 2009; Geler *et al*, s.f.).

### 1.2.6. Erosión en Chile (estudios destacados)

La percepción común sobre el ámbito de la degradación de suelos en Chile es que los estudios que buscan la medición del fenómeno son escasos o se presentan a escalas generalizadas que además implican mucho costo en su elaboración. Aun así, a lo largo de las décadas anteriores, diversas instituciones del sector público y académico han realizado sendos trabajos entre los que destacan el realizado por el desaparecido Instituto de Recursos Naturales (IREN) en 1979, que calculó la erosión de la superficie nacional en 34,4 millones de hectáreas (46% de la superficie total país). Aquella investigación descartó de la medición a zonas de archipiélagos y ciertas áreas de la cordillera andina (**Tabla 1.2.**):

**Tabla 1.2 Superficies de erosión por región categorizadas**

Categorías de erosión (hectáreas)					
REGIONES	MUY GRAVE	GRAVE	MODERADA	LEVE	TOTAL
I	38.750	1.027.375	1.116.075	356.768	2.538.968
II	-	1.435.200	1.120.135	126.250	2.681.585
III	1.056.250	152.250	809.250	630.375	2.648.125
IV	-	654.260	1.425.690	1.370.610	3.459.560
V	51.100	231.795	146.825	463.950	8.963.670
VI	198.377	544.429	210.624	19.918	973.348
VII	152.409	662.371	686.598	36.465	1.538.023
VIII	175.680	818.494	1.167.531	200.442	2.362.147
IX	65.841	809.396	1.533.320	69.537	2.478.094
X	401.964	593.373	1.655.914	2.194.865	4.846.116
XI	145.250	909.875	2.179.500	1.389.875	4.624.500
XII		900.000	3.463.500	524.250	4.877.750
RM	95.225	387.790	58.752	17.100	558.867
TOTAL	2.380.846	9.126.608	15.573.714	7.409.585	34.490.753

Fuente: Elaboración propia en base a IREN (1979)

La metodología empleada en el proyecto IREN (1979) se basó en la interpretación de unas imágenes satelitales del sensor Landsat Multispectral Scanner System (MSS) en formato de diapositivas transparentes. Estas se analizaron a través de un visor multispectral en las bandas del azul, verde, rojo e infrarrojo del espectro electromagnético, detectando y delimitando unidades homogéneas desde el punto de vista de los descriptores de uso actual, niveles de cobertura vegetal y niveles de erosión. El estudio para la clasificación del fenómeno erosivo en cada uno de los ecosistemas naturales detectados y delimitados, se efectuó a través de correlaciones entre geoforma y rangos de erosión y se estableció una clasificación con cuatro niveles: leve, moderado, grave y muy grave (Flores *et al*, 2010)

En aquella oportunidad la IV Región de Coquimbo se posicionó como una de las regiones más erosionadas de Chile.



Un nuevo estudio realizado por el Centro de Información de Recursos Naturales a partir de 2007 y lanzado el 2010 arrojó nuevos datos sobre la erosión a nivel nacional, y se actualizó 36,8 millones de hectáreas. Este estudio, que fue una colaboración entre las instituciones de CIREN, CONAF, SAG, ODEPA E INDAP culminó con la entrega de las cartografías de erosión actual y erosión potencial a nivel semidetallado 1:50.000 y generalizado a escala 1:250.000 para todo el país.

El primer resultado (**Tabla 1.3.**) fue obtenido mediante técnicas geomáticas de clasificación de datos de imágenes Landsat 5, en conjunto con sistemas de información geográfica, uso de índices espectrales, validación en terreno e interpretación con paneles de expertos de instituciones del Ministerio de Agricultura (Flores *et al*, 2010) La clasificación estableció un criterio con cinco categorías de erosión: Nula, Ligera, Moderada, Severa y Muy severa.

**Tabla 1.3 Superficie de erosión actual en categorías, nivel regional**

Superficie de potencial (miles de hectáreas) por Región								
Región	Sin erosión	Erosión Ligera	Erosión Moderada	Erosión Severa	Erosión muy Severa	Suelo Erosionado	Erosión (%)	Total Regional
Arica y Parinacota	50	256	172	469	584	1480	87,8	1686
Tarapacá	63	1047	602	1153	838	3640	86,1	4226
Antofagasta	138	1371	3242	3593	2021	10227	81,2	12602
Atacama	178	825	537	2030	629	4021	53,1	7567
Coquimbo	210	572	1142	1214	492	3420	84,2	4060
Valparaíso	162	244	325	258	80	907	56,7	1600
Metropolitana	354	93	189	213	187	683	44,3	1541
O'Higgins	331	96	454	197	115	861	52,6	1638
Maule	656	349	416	378	336	1479	48,7	3034
Bio Bio	840	393	429	212	149	1183	31,9	3712
La Araucanía	1132	280	241	244	146	911	28,6	3186
Los Ríos	427	262	198	80	6	545	29,7	1837
Los Lagos	751	575	423	139	33	1170	24,2	4834
Aysén	235	895	743	383	583	2605	24,1	10797
Magallanes	1721	1123	1289	590	761	3763	28,5	13207
<b>Total General</b>	<b>7248</b>	<b>8382</b>	<b>10401</b>	<b>11152</b>	<b>6960</b>	<b>36895</b>	<b>48,9</b>	<b>75526</b>

Fuente: Elaboración propia en base a Flores *et al* (2010).

En el marco del mismo estudio se estimó la erosión potencial de los suelos de Chile, es decir, las pérdidas de suelos que tendrían lugar en caso de no existir vegetación. Esto se estimó mediante un modelo empírico cualitativo IREPOT, el cual integra las características internas de los suelos, la topografía, el clima y las condiciones biológicas. La clasificación ocupa cuatro rangos de erosión: Baja o nula, Moderada, Severa y Muy severa (**Tabla 1.4.**):

**Tabla 1.4 Superficie de erosión potencial en categorías, nivel regional**

Superficie de potencial (miles de hectáreas) por Región							
Región	Erosión Baja o nula	Erosión Moderada	Erosión Severa	Erosión muy Severa	Suelo Erosionado	Erosión (%)	Total Regional
Arica y Parinacota	546	345	353	283	1527	90,6	1686
Tarapacá	1967	799	620	407	3793	89,8	4226
Antofagasta	7370	1890	1225	572	11057	87,7	12602
Atacama	1971	832	1089	1123	5015	66,3	7567
<b>Coquimbo</b>	<b>529</b>	<b>489</b>	<b>922</b>	<b>1710</b>	<b>3650</b>	<b>89,9</b>	<b>4060</b>
Valparaíso	107	189	421	506	1223	76,4	1600
Metropolitana	256	86	264	464	1070	69,4	1541
O'Higgins	290	208	339	610	1447	88,3	1638
Maule	629	423	588	947	2587	85,3	3034
Bio Bio	989	716	653	1098	3456	93,1	3712
La Araucanía	916	526	662	875	2979	93,5	3186
Los Ríos	341	315	320	687	1663	90,5	1837
Los Lagos	417	919	878	1843	4057	83,9	4834
Aysén	395	1007	1418	2544	5364	49,7	10797
Magallanes	3548	814	687	466	5515	41,8	13207
Total General	20271	9558	10439	14135	54403	72,0	75527

Fuente: Elaboración propia en base a Flores *et al* (2010).

### 1.2.7. Causas de la erosión en la región de Coquimbo

Autores como Jorquera (2001), destacan a las actividades del sector agropecuario como las mayores responsables del estado actual de los suelos en la región, también mencionando su papel en el desgaste o erradicación de la vegetación nativa (**Figuras 1.11. y 1.12.**). Flores *et al* (2010) desde su visión, señala rol que han tenido las prácticas antrópicas como la deforestación, el sobrepastoreo, la expansión urbana y las malas prácticas silvícolas en el fenómeno erosivo, aunque también se refiere a la intrínseca degradación que se origina por condiciones naturales. Esto es especialmente cierto en la Cordillera de los Andes, donde los fenómenos geológicos o naturales se constituyen como las principales causas de pérdidas de suelo. En la IV Región este proceso es favorecido por las condiciones edafoclimáticas, la topografía abrupta de montaña y lomajes, los suelos altamente erodables, la vegetación semiárida y la alta agresividad de las precipitaciones. Este último factor puede parecer sorpresivo dada las condiciones de déficit hídrico en la región, pero lo cierto es que en zonas semiáridas existe una fuerte concentración de las lluvias (en un solo día puede llover el total anual), lo que las vuelve eventos más catastróficos o intensos cuando ocurren.

Figura 1.11 Impacto atribuible a la agricultura

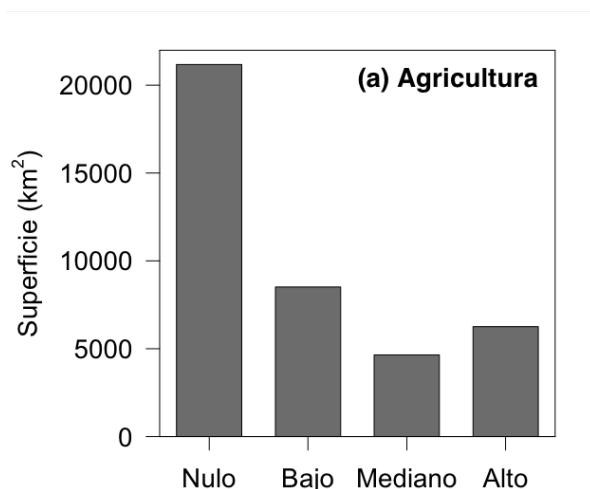
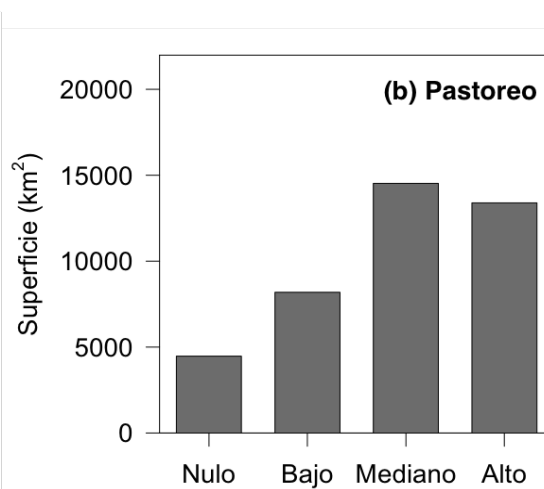


Figura 1.12 Impacto atribuible a pastoreo



Fuente: Jorquera (2001)

Volviendo al rol del sector agropecuario, se puede decir que este desde los 80' experimento un notable crecimiento en la región, que puede ser explicado por la presencia de las ventajas agroclimáticas, la apertura comercial y el rol jugado por el Gobierno de Chile en la inversión de sistemas de riego. Destacan en la provincia de Limarí los embalses Recoleta (Río Hurtado), Cogotí (Río Guatalume) y Paloma (aguas abajo Ríos Grande y Rapel). El sistema conformado por los tres riega una superficie aproximada de 64 mil hectáreas en la provincia de Limarí, con un 85% de seguridad de riego (Universidad Católica del Norte, 2007). La habilitación de infraestructura tuvo como consecuencia más importante en la provincia, la expansión de los cultivos hacia terrenos fuera de los fondos de valle principales, invadiendo rinconadas, conos aluvionales, laderas, taludes coluviales, etc. (Ferrando, 2002).

Jorquera (2001) señala al respecto que los avances tecnológicos de las décadas más recientes son adoptados en el país por productores con orientación comercial, contribuyendo a la expansión del territorio agrícola mediante la habilitación de suelos marginales. Sin embargo, la incorporación de tecnología no ha sido acompañada necesariamente de la aplicación de criterios conservacionistas, por lo que es común la pérdida de recursos nativos en las áreas de expansión agrícola, la contaminación superficial y subsuperficial de fuentes de agua, la emisión de contaminantes a la atmósfera y la erosión de los suelos. Por ejemplo, Gwynne (1994) citado por Ferrando (2002) señala que en el Norte Chico la variación anual de la lluvia es mayor al 48%; que las sequías ocurren por lo menos una por década (teniendo una duración entre 3 a 6 años); y que la precipitación anual descendió al menos un 30% durante el siglo XX. Aun así, la tendencia a la expansión de hectáreas para cultivo continúa pese a que el recurso agua (considerado como renovable) pudiera estar alcanzando su máxima capacidad de uso (Gwynne, 1996, citado por Ferrando, 2002). Tal como señala Arias (2000) citado por Medina, las características

áridas y semiáridas de la IV región hacen necesario el riego artificial para aprovechar de mejor manera las tierras cultivables, de esta forma el aumento de la demanda de agua, sumado al proceso de desertificación, provoca una disminución crítica del recurso.

También se puede profundizar sobre el rol agroexportador en la disminución de la cubierta nativa, por medio de la habilitación de laderas para el cultivo de frutales y viñas, sumándose a la ya conocida y extensa degradación provocada por el sistema de “lluvias” que consiste en la preparación y siembra de granos en zonas de secano (mayoritariamente en terrenos inclinados) a la espera de las precipitaciones invernales. (Jorquera, 2001). Esta forma de cultivo junto con el pastoreo ha dejado profundas huellas en aquellos ambientes de la región, lo que se traduce bajo la forma de procesos intensos de erosión y en el desplazamiento y/o desaparición de especies autóctonas que originalmente crecían en aquellos sectores, tales como *Prosopis chilensis*, *Geoffrea decorticans*, *Monttea chilensis*, etc. (Arancio, s.f citado por Jorquera, 2001). A esto también hay que sumar el efecto de la histórica explotación caprina que ha incidido en el progresivo deterioro de los suelos y los recursos vegetales que sustentan este ganado (Jorquera, 2001).

En la zona de montaña media, donde está emplazada la comuna de Punitaqui, se puede asociar el estado de los suelos a las prácticas de las denominadas “comunidades agrícolas”. IREN (1977) citado por Jorquera (2001) describe el emplazamiento de estas comunidades como grandes extensiones de secano con escaso o nulo potencial agrícola, de topografía más bien accidentada, y pequeñas porciones de tierra bajo riego eventual o permanente. En este espacio se ha desarrollado una forma de aprovechamiento de la estepa con fines ganaderos, pero la baja productividad de esta formación vegetal es la que explica la práctica de la transhumancia, es decir el desplazamiento constante de ganado entre la costa y la cordillera, en busca de pastos para su alimentación. Otra práctica asociada a la vegetación se refiere al consumo de leña y carbon vegetal como combustible (Novoa & Lopez, 2001). Medina (2006) acusa que la sobreexplotación de los recursos agrícolas y ganaderos en las tierras de estas comunidades (en las cuales prima una economía de autosubsistencia) se debe a que los comuneros deben obtener un mínimo de producción en tierras que son naturalmente poco fértiles, en un contexto de libre competencia, y en el cual gran parte de los derechos de aguas de la región corresponden a grandes productores, quienes la destinan al riego de hortalizas y frutales y al consumo de los animales de ganado.

En este contexto, de las tres provincias que componen la Región de Coquimbo, la Provincia de Limarí es la segunda con mayor erosión de suelos tras la provincia del Elqui, en categorías que van distribuidas desde baja a muy severa. La comuna de Punitaqui que pertenece a Limarí cuenta con una superficie actual de 133.9 km<sup>2</sup> de los cuales 125.5 km<sup>2</sup> se hallan erosionados, lo que vienen a representar el 93,8% de la superficie total, hecho que la posiciona como una de las 3 comunas de la región con mayores problemas en cuanto a este aspecto. Este cálculo está extrapolado del estudio de Flores et al (2010) que fue realizado para todo Chile (**Tabla 1.5**):

Tabla 1.5 Superficie de erosión actual en la provincia de Limarí

Superficie de actual (miles de hectáreas) por Región									
Provincia/ Comuna	Erosión muy Severa	Erosión Severa	Erosión Moderada	Erosión Ligera	Erosión no aparente	Sin Erosión	Superficie erosionada	Total Comunal (km2)	Erosión (%)
<b>Elqui</b>	381051	472126	393985	163011	9659	49310	1410173		
La Higuera	185738	112605	65525	28427		2977	392295	414673	94,6
Vicuña	121144	247999	188492	23682	270	13086	581317	759678	76,5
La Serena	41544	53801	49161	27754	299	13123	172260	190176	90,6
Coquimbo	4474	14001	31256	65860	8430	14233	115591	142509	81,1
Andacollo	12857	11036	15377	8584	493	1410	47854	51544	92,8
Paihuano	15294	32684	44173	8704	87	4482	100855	149552	24,3
<b>Limarí</b>	63153	428158	413713	220518	8943	101142	1125542		
Ovalle	14108	83653	106048	88916	4712	52007	292725	355206	82,4
Río Hurtado	15257	77933	71194	22001	3283	5731	186385	220514	84,5
<b>Punitaqui</b>	<b>9091</b>	<b>36139</b>	<b>35480</b>	<b>20851</b>	<b>69</b>	<b>7210</b>	<b>101561</b>	<b>108897</b>	<b>93,3</b>
Monte Patria	17846	180803	110438	27264	429	27898	336351	420779	79,9
Combarbalá	6851	49630	90553	61486	450	8297	208520	229679	90,8
<b>Choapa</b>	47964	311032	333965	175889	6930	59009	868850		
Canela	12554	69326	73727	50084	984	8433	205691	219481	93,7
Illapel	15644	86834	74496	49918	125	19240	226892	262924	86,3
Los Vilos	8042	48868	76949	37840	5474	6901	171699	185944	92,3
Salamanca	11724	106004	108793	38047	346	24435	264568	344947	76,7
<b>Total Regional</b>	<b>492168</b>	<b>1211316</b>	<b>1141663</b>	<b>559418</b>	<b>25532</b>	<b>209461</b>	<b>3404565</b>	<b>4056502</b>	<b>100,0</b>

Fuente: Flores *et al* (2010)

Del estudio anterior también se derivó según región y provincia, la erosión potencial. Este cálculo se obtuvo a partir del modelo empírico cualitativo (IREPOT) que está basado en la conceptualización de la erosión potencial descrita por Wischmeier & Smith (1978) en la que se relacionan en dos componentes principales, erodabilidad del suelo y erosividad de la lluvia. Este modelo, se basó en el supuesto de que la potencialidad de erosión es independiente del uso y manejo actual del suelo. En otras palabras, representa las pérdidas, arrastre o transporte de partículas del suelo que tendrían lugar en caso de no existir vegetación (**Tabla 1.6.**):

**Tabla 1.6 Superficie de erosión potencial en la provincia de Limarí:**

Superficie de potencial (miles de hectáreas) por Región						
Provincia/ Comuna	Erosion muy Severa	Erosión Severa	Erosión Moderada	Erosión baja o nula	Superficie erosionada	Total Comunal (km2)
<b>Elqui</b>	729125	364110	178554	207907	1479696	
La Higuera	152574	120213	60128	68876	401791	414673
Vicuña	414218	133002	41520	11818	600558	759678
La Serena	54758	54228	34859	40478	184323	190176
Coquimbo	11054	23857	25342	78320	138573	142509
Andacollo	15480	15116	10775	8138	49509	51544
Paihuano	81041	17695	5929	97	104762	149552
<b>Limarí</b>	505691	278180	202933	241594	1228398	
Ovalle	44657	70630	85096	148457	348840	355206
Río Hurtado	113184	50683	21936	8548	194351	220514
<b>Punitaqui</b>	20709	32843	26644	27929	108125	108897
Monte Patria	246657	75525	28678	10318	361178	420779
Combarbalá	80485	48500	40579	46342	215906	229679
<b>Choapa</b>	475586	279768	104952	74364	934670	
Canela	66314	71603	42341	35155	215413	219481
Illapel	136380	67388	26863	14694	245325	262924
Los Vilos	85062	61291	17227	19459	183039	185944
Salamanca	187830	79485	18520	5056	290891	344947
<b>Total Regional</b>	<b>1710402</b>	<b>922058</b>	<b>486439</b>	<b>523865</b>	<b>3642764</b>	<b>4056503</b>

Fuente: Flores *et al* (2010)

A diferencia de los dos productos anteriormente señalados y que fueron elaborados por Flores et al (2010) para el Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN), el modelo USLE desarrollado en este trabajo considera que todos los suelos de la comuna de Punitaqui se encuentran bajo algún grado de erosión. También conviene señalar que la falta de datos es una característica reiterada para el cálculo de ciertos parámetros como por ejemplo, los que reflejan la influencia erosiva de las precipitaciones y que se basan en las intensidades de eventos de tormenta a lo largo de un gran periodo de años. Otro aspecto es que aparte de EE.UU y algunos países selectos, no es común el contar con las tabulaciones de datos para obtener los factores de manejo de cultivo y prácticas de control de la erosión. En el caso del primero, puede calcularse de forma alternativa mediante ecuaciones de regresión usando los valores de un Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), tal como se describe más adelante. Para el caso del segundo, se necesitan saber las prácticas de conservación en cultivos según niveles de pendiente. Como en general este dato no es asequible, muchos estudios de USLE dejan el valor de este parámetro en 1.

La consecuencia más importante de no contar con esta información a nivel nacional para usos de suelo agrícola es que el modelo final desprecia parte de la erosión que ocurre en las zonas de fondo de valle.

### 1.3. Objetivos

#### 1.3.1. Objetivo general

Estimar la erosión actual y potencial de la comuna de Punitaqui mediante la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE).

#### 1.3.2. Objetivos específicos

- a. Estimar y caracterizar los factores de la ecuación USLE para la comuna de Punitaqui
- b. Modelar las pérdidas potenciales y actuales de suelo en la comuna, detectando localidades más y menos afectadas.
- c. Caracterizar las pérdidas potenciales y actuales de suelo en la comuna desde la óptica de la conservación del recurso.

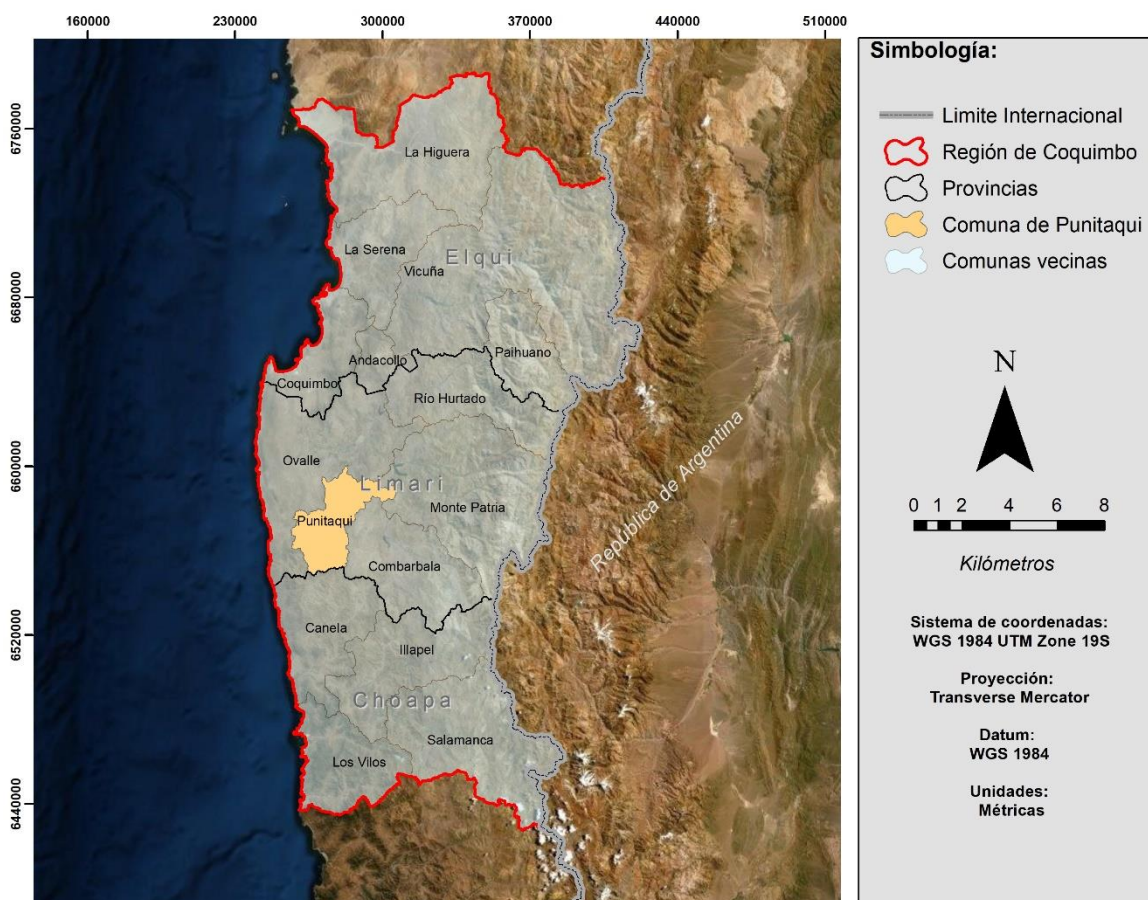
## 2. Materiales y métodos

### 2.1. Antecedentes Generales:

#### 2.1.1. Área de Estudio

La comuna de Punitaqui está ubicada en el área centro sur de la Provincia del Limarí (Región de Coquimbo) aproximadamente entre los 30° 05' y 31° latitud sur y los 70° 01' y 71° 1' longitud oeste. Limita al norte y al oeste con la comuna de Ovalle; al noreste con la comuna de Monte Patria, al sureste con la comuna de Combarbalá y al sur con la comuna de Canela (Figura 2.1).

Figura 2.1 Contexto Regional Comuna de Punitaqui



Fuente: Elaboración propia



### 2.1.2. Macro unidades morfológicas, clima e hidrografía

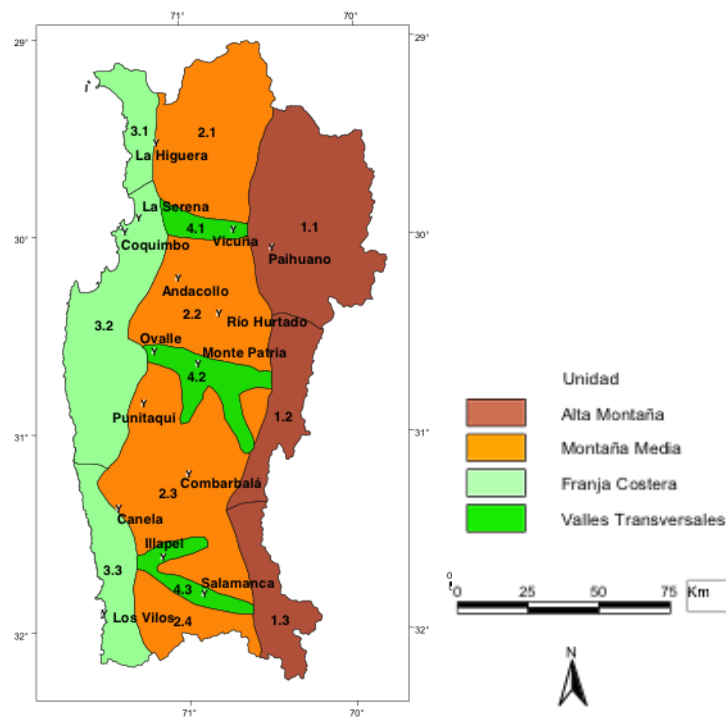
Desde el punto de vista físico natural, la IV Región de Coquimbo se destaca por la ruptura de la ordenación general del relieve, razón que ha llevado a denominarla como la región de los valles transversales, debido al predominio de una transversalidad en vez de la tendencia longitudinal que es común al resto del país (Novoa, 1989 citado por Novoa, 2001). En base a Novoa (2001) se puede destacar el dominio, desde un punto de vista morfológico de cuatro unidades: alta montaña, media montaña, valles transversales y faja litoral, las que se describen a continuación:

- Alta montaña: Corresponde a la Cordillera de los Andes, y ocupa la posición extrema oriental de la región, distinguiéndose por sus alturas y su capacidad de retención nival. La cordillera en esta región se caracteriza por la ausencia de vulcanismo cuaternario. Sus cumbres superan los 3500 m, alcanzando sobre la frontera chileno-argentina los 6000 m de altitud.
- Media montaña: Representada por los relieves inferiores a los 3000 msnm y que junto a las formas de disección que los recorren, configuran una unidad cuyo límite occidental corresponde en gran parte al contacto con formas de erosión y sedimentación tanto marinas como continentales. La característica principal de esta unidad es una intensa disección fluvial que se muestra por una alta densidad de divisorias secundarias, que se desprenden de las divisorias principales y que conforman una red de drenaje. Las laderas presentan un perfil rectilíneo que adquiere hacia la base una débil concavidad. La parte media y alta de las laderas presenta una cubierta de sedimentación discontinua, con numerosos afloramientos de roca en forma de farallones surcados por corredores de derrubios
- Valles Transversales: Los Valles Transversales, en su sección alta, se configuran de abruptas paredes donde es común hallar remanentes de cuerpos de hielo de glaciales pleistocénicos, cubiertos de una espesa capa de derrubios y rodeados de potentes depósitos morrénicos. Esto es importante de mencionar puesto que gran parte de los cursos de agua se originan a partir de estos cuerpos gélidos. Los Valles Transversales corresponden a los cursos medios de los ríos Elqui, Limarí y Choapa. Los caudales de dichos ríos, pese su irregularidad temporal, interrumpen sucesivamente la media montaña y más al oeste las terrazas marinas manifestando una diferenciación significativa respecto al paisaje árido y semiárido en que se encuentran inmersos. Al haberse originado en la Cordillera de los Andes sus aguas posibilitan el asentamiento de población y desarrollo agrícola.
- Faja Litoral: Unidad en la que se inicia el dominio de las terrazas de sedimentación

marina. Por ejemplo Los Altos de Talinay presentan un conjunto de plataformas de abrasión marina que se correlacionan con los niveles de sedimentación de las bahías de Coquimbo y Tongoy. Estas terrazas litorales limitan hacia el este con macizos de varios cientos de metros, que están separados unos de otros por quebradas que han formado los cursos de agua en su trayecto para alcanzar el mar. (Huerta, 2009)

La comuna de Punitaqui se ubica en la segunda unidad regional, en la zona de media montaña específicamente en el sector norte del interfluvio Limarí-Choapa, constituido por una serie de cumbres que van disminuyendo hacia la costa. (Medina, 2006) (**Figura 2.2.**):

**Figura 2.2 Macro unidades Región de Coquimbo**



Fuente : Romero *et al* (1988) en Novoa (2001)

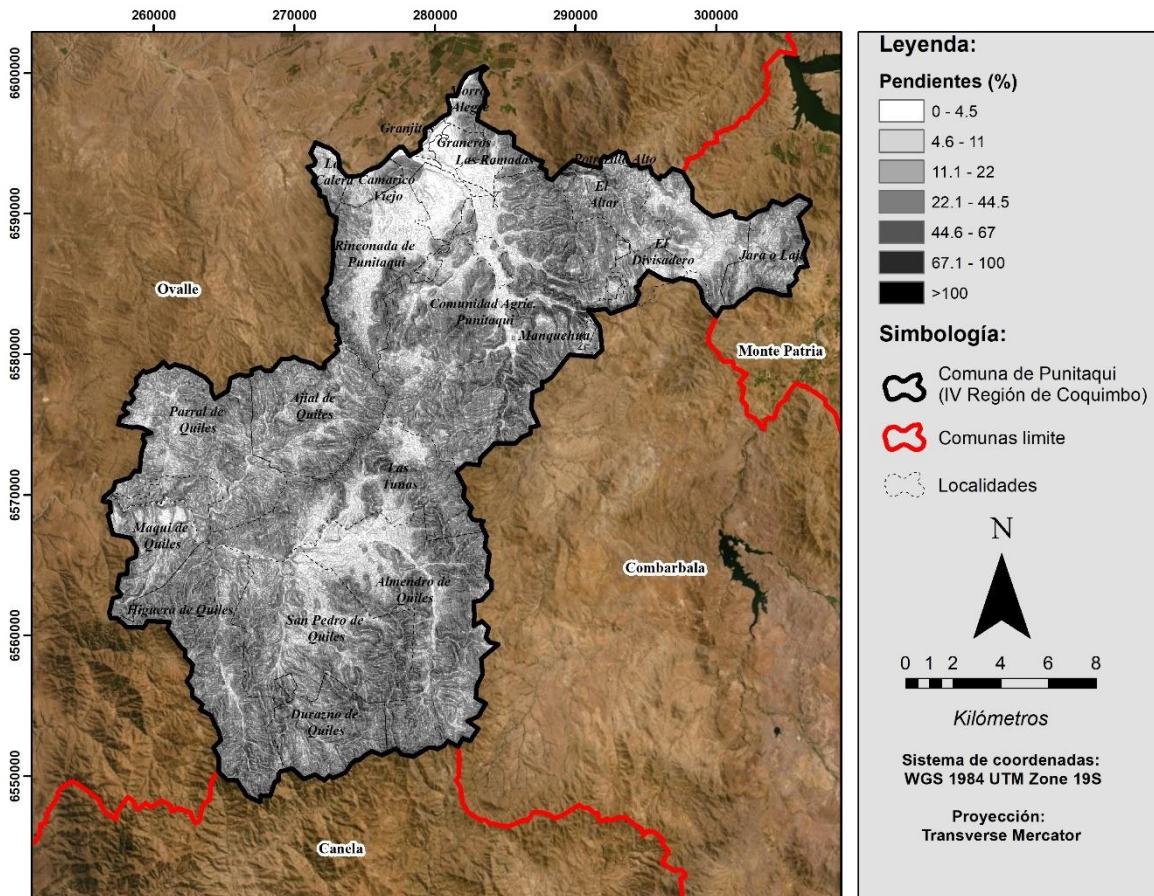
Una caracterización topográfica realizada en base a la clasificación de Araya-Borgel (1972) (**Tabla 2.1. y Figura 2.3.**) refleja que en la comuna dominan mayormente las pendientes de tipo fuerte donde se pueden asociar procesos de erosión intensa o erosión lineal frecuente e incluso el desarrollo de cárcavas:

Tabla 2.1 Rango de pendiente según umbrales morfo dinámicos

Pendiente (°)	Pendientes (%)	Concepto	Umbral Geomorfológico
0 - 2	0 - 4.5	Horizontal	Erosión nula a leve
2.1 - 5	4.6 - 11	Suave	Erosión débil, difusa. <i>Shett wash</i> . Inicio de regueras. Soliflucción fría
5.1 - 10	11.1 - 22	Moderada	Erosión moderada a fuerte. Inicio erosión lineal. Rill-wash o desarrollo de regueras.
10.1 - 20	22.1 - 44.5	Fuerte	Erosión intensa. Erosión lineal frecuente. Cárcava incipientes
20.1 - 30	44.6 - 67	Muy fuerte a Moderadamente Escarpada	Cárcavas frecuentes. Movimientos en masa. Reptación
30.1 - 45	67.1 - 100	Escarpada	Coluvionamiento. Soliflucción intensa
> 45	> 100	Muy Escarpada a Acantilada	Desprendimiento y derrumbes. Corredores de derrubios frecuentes

Clasificación de pendientes propuesta por Araya-Vergara & Borgel (1972)

Figura 2.3 Topografía en Punitaqui



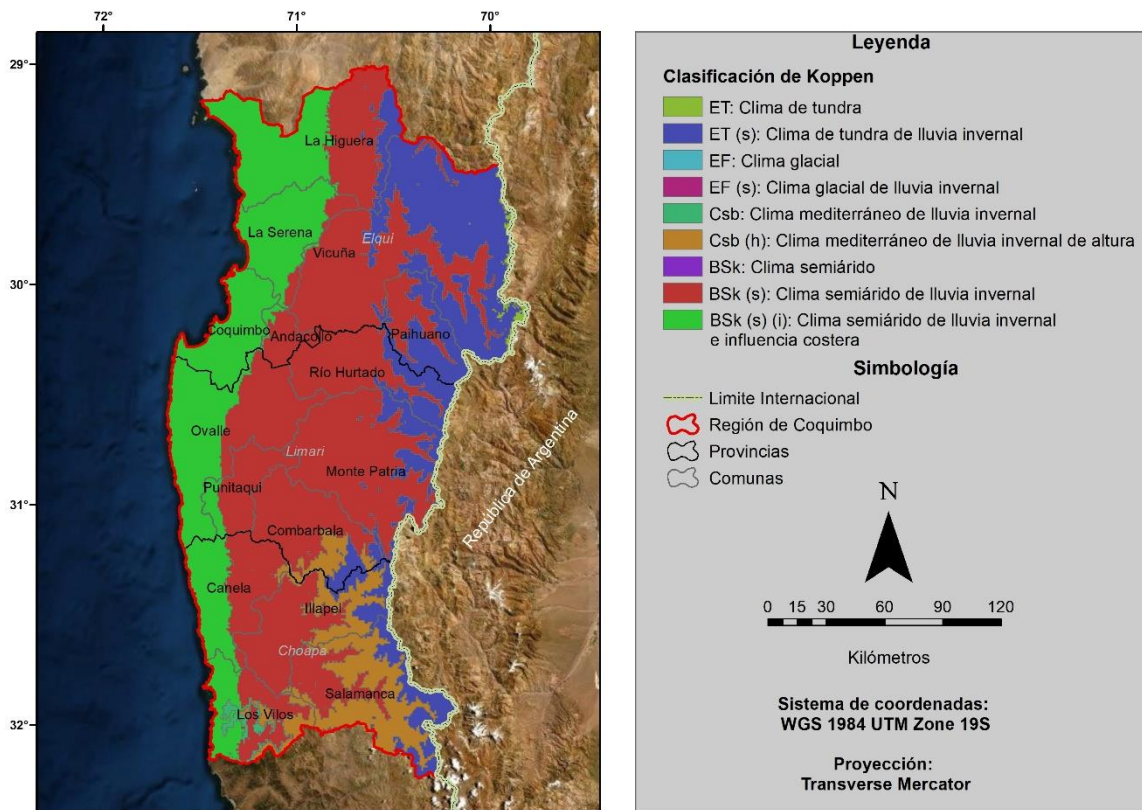
Fuente: Clasificación de pendientes propuesta por Araya-Vergara & Borgel (1972)

### 2.1.3. Características climáticas e hidrológicas

El clima de IV Región está fuertemente condicionado por el Anticiclón del Pacífico. La temperatura media anual a lo largo de la costa es de 14°C, aumentando hacia el interior a 16°C. La precipitación media anual en el interior es de 100 mm (en base al promedio de la comuna de Ovalle), mientras que en la Cordillera de los Andes es de aproximadamente 180 mm. La zona se caracteriza también por fuertes variaciones inducidas por los vientos del Oeste que se correlacionan con los años de “El Niño” que traen lluvias intensas e inundaciones repentinas (Astudillo, 2011)

Se puede describir el clima de la zona mediante la clasificación de Köppen-Geiger (1900) que fue usada por Sarricolea *et al* (2017). (**Figura 2.4.**):

**Figura 2.4 Contexto climático según los climas de Köppen-Geiger (1900)**



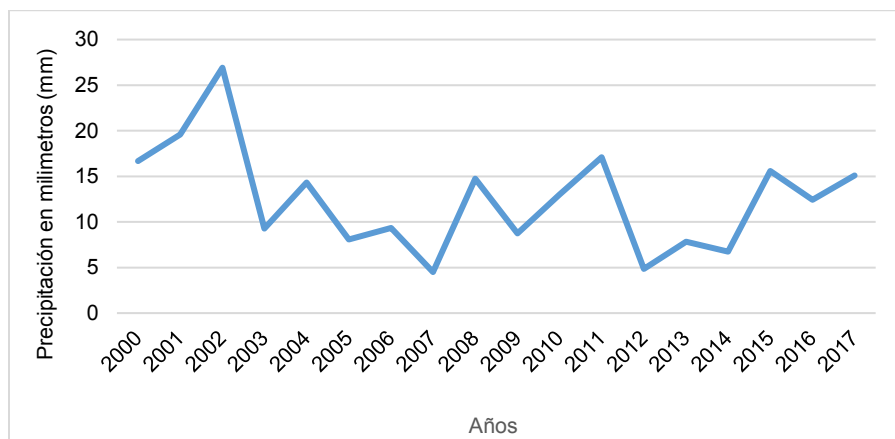
Fuente: Elaboración propia en base a Köppen-Geiger (1900) en Sarricolea *et al* (2017)

En base a esta clasificación se tiene que en Punitaqui existe la presencia de 2 climas semiáridos de tercer orden: semiárido de lluvia invernal e influencia costera ( $BSk_{(s)(i)}$ ) que coincide con la zona de franja litoral y semiárido de lluvia invernal ( $BSk_{(s)}$ ) que queda

emplazado en la zona de montaña media. En general este tipo de climas dictan inviernos fríos o muy fríos y a la vez veranos templados o cálidos con una vegetación de estepa.

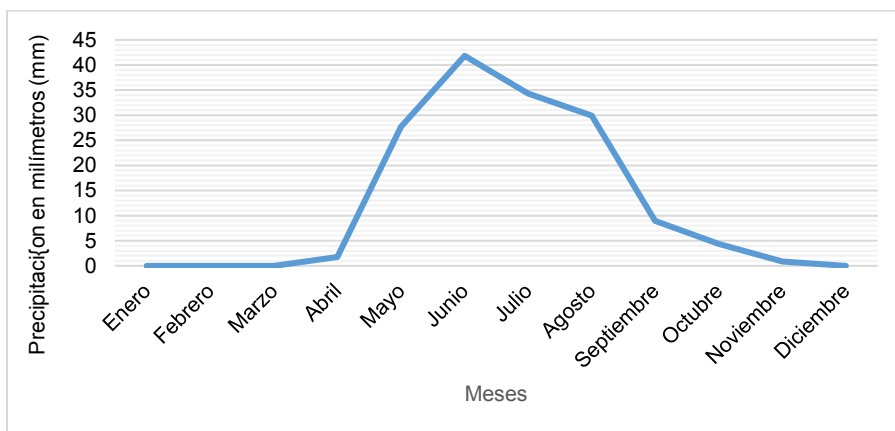
Climáticamente caracterizada por condiciones de déficit hídrico, el comportamiento de las precipitaciones en la región durante el siglo XX e inicios de este siglo ha ido a la baja. Por ejemplo durante el periodo de años que contempla este estudio, el promedio de todas las precipitaciones en 18 años del 2000-2017 fue de 12,48 mm. (**Figura 2.5.**) y el comportamiento mensual ilustra que dentro de ese mismo periodo las lluvias tendieron a concentrarse entre los meses de mayo y agosto siendo junio el mes más lluvioso (**Figura 2.6.**)

**Figura 2.5 Precipitación media anual en Punitaqui, periodo 2000-2017**



Fuente: Elaboración propia en base a Abatzoglou *et al* (2018)

**Figura 2.6 Comportamiento de la precipitación media mensual**

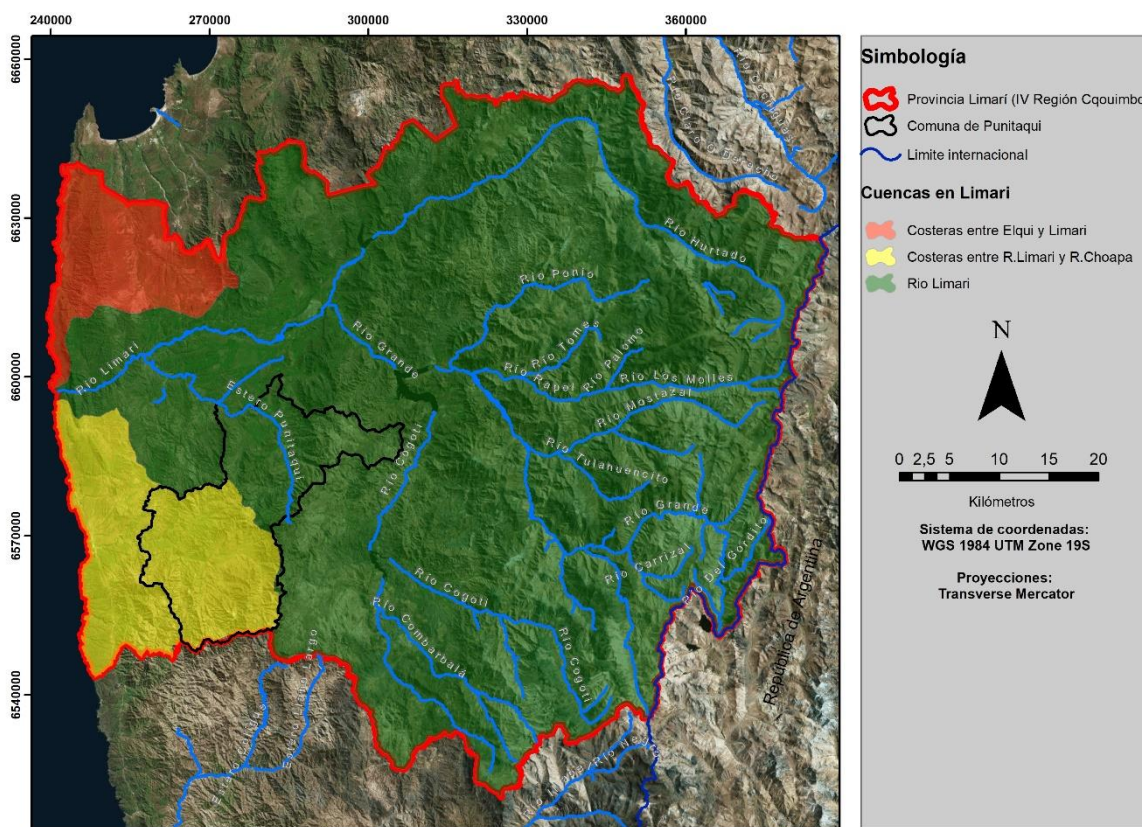


Fuente: Elaboración propia en base a Abatzoglou *et al* (2018)

La zona se constituye de un valle principal asociado al Estero Punitaqui, de altura entre 230 y 300 msnm, que corre de norte a sur rodeado de cerros al oriente y poniente. Entre estos hay numerosas quebradas en dirección Este-Oeste, cuyas escorrentías superficiales confluyen en el Estero Punitaqui que es un afluente de escasa importancia del río Limarí y tiene su origen en la Cordillera de la Costa. (Medina, 2006) (**Figura 2.7**).

La cuenca del Estero Punitaqui corresponde a un sistema de drenaje secundario con nacimiento en la precordillera y alcanza una superficie aproximada de 1239 km<sup>2</sup>. Cuenta con un régimen pluvial, y su hoya hidrográfica se encuentra a muy baja elevación, de manera que no recibe aportes nivales. Los mayores caudales ocurren entre julio y septiembre. Existen diferentes tipos de cauces según la regularidad de su permanencia: cauces esporádicos, estacionales y permanentes. La mayor parte de los que existen en la comuna corresponden al tipo esporádico, los que se encuentran secos la mayor parte del año debido a los escasos remanentes de las precipitaciones.

**Figura 2.7 Contexto de Punitaqui en red hidrográfica de la provincia de Limarí:**



Fuente: Elaboración propia en base a DGA (2007)

#### 2.1.4. Principales actividades económicas, uso de suelo y vegetación

La actividad exportadora de la Región de Coquimbo destaca por la producción minera (cobre y hierro), la uva de mesa y la producción de pisco. (Flores *et al*, 2013). Como zona agrícola la región muestra una orientación frutícola exportadora, que se ha desarrollado de la mano de productos de rápido crecimiento en los mercados internacionales. En términos de estructura del uso de suelo, de las estimadas 95 mil hectáreas utilizadas con fines agropecuarios, un 35% corresponden a la categoría de frutales y viñas, un 10% a hortalizas y flores y un 8% a cultivos anuales (Universidad Católica del Norte, 2007).

En general desde la década de los 80', la Región de Coquimbo ha experimentado una fuerte expansión del sector agropecuario, lo que se debe a las ventajas agroclimáticas que posee la Región para la producción de primores y en la amplitud de alternativas de cultivo especialmente frutales, vides viníferas y hortalizas. También se puede atribuir al modelo económico y a los instrumentos de reconversión disponibles para los agricultores, lo que ha significado un importante estímulo a la reconversión de ciertos rubros y a la habilitación de nuevos espacios para la agricultura especialmente para el cultivo de frutales destinados a la exportación (Jorquera, 2001).

La provincia que desempeña el mayor papel en este aspecto es la de Limarí, donde coexisten dos tipos agricultura: por una parte, una agricultura asociada al riego en una condición semiárida, y por otra aquella de secano de tipo marginal, caracterizada principalmente por la explotación del ganado caprino y por el cultivo en laderas de cereales de secano. Este último tipo de agricultura comprende la mayoría de los suelos en laderas de cerro y planicies sobre cota de canal y se relaciona principalmente con el sector de comunidades agrícolas (Delgado, 2001)

Como señala Astudillo (2011) en Limari se concentra el 48% de la superficie regional y un 70% de las exportaciones regionales y cuenta con una superficie total de aproximadamente 1,2 millones de hectáreas de las cuales han sido cultivadas entre el 3 y 5%.

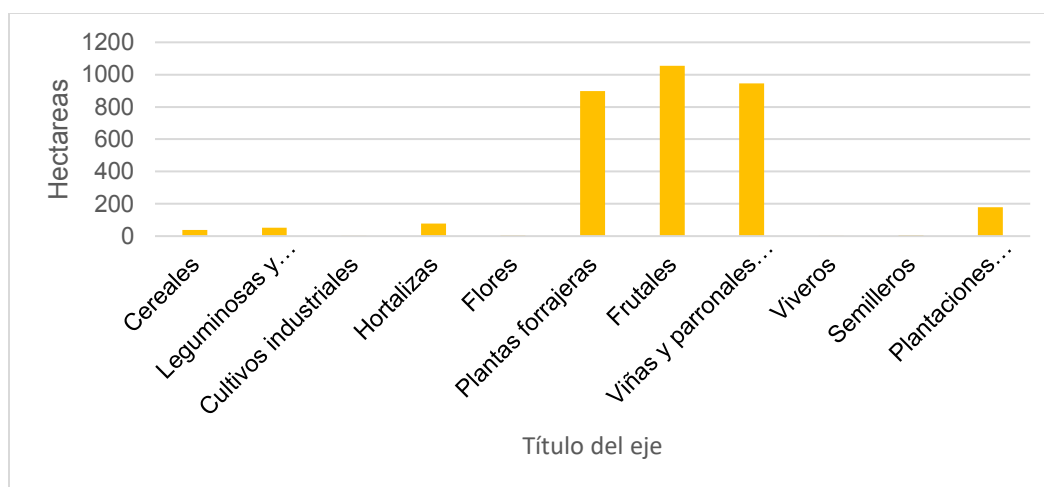
Aun teniendo en cuenta la expansión agrícola experimentada a nivel regional y provincial, la comuna de Punitaqui según como señala Delgado (2001) no modificó en forma sustancial su ordenamiento territorial y respondió con mucha posterioridad al boom agrícola, esto último debiéndose a factores físicos, sociales y económicos. Por ejemplo, la cercanía del valle de Punitaqui con la costa, lo condiciona para que sus tierras no esten cubiertas con parronales, por la falta de condiciones de calor necesarias para la uva de mesa y su cosecha temprana. También puede decirse que la prevalencia de las comunidades agrícolas lo hace poco llamativo para los inversionistas.

Punitaqui nació como comunidad minera, produciendo oro, cobre y mercurio, siendo este último el principal recurso de la comuna, dada su escasez en el resto del territorio nacional y su importancia para el procesamiento de otros minerales. La actividad minera tuvo gran importancia hasta la segunda mitad del siglo pasado y constituyó la base económica del área, hasta que comenzó a decaer debido al agotamiento progresivo de los más importantes yacimientos mineros (Delgado, 2001). Tradicionalmente la agricultura y la

minería se complementaban en una dinámica en la cual la población residente lograba su base alimenticia en la agricultura de secano y conseguía los ingresos monetarios para proveerse de los otros productos, a través de la minería. Es a partir de la década de los 60' que comenzó una especialización económica de la localidad hacia la agricultura, sobre todo cuando se empezó a asignar agua del Sistema Paloma a los terrenos agrícolas como una forma de promoverlos ante la inminente paralización de la minería. (Delgado, 2001)

En la actualidad las principales actividades económicas en Punitaqui se basan en la producción de uva pisquera, realizándose además la crianza de ganado caprino y el cultivo de las praderas para empastadas como alfalfa y otras especies, más el cultivo de hortalizas y frutales como paltos, cítricos y durazneros. (Infraestructura y Ecología S.A., 2015). De acuerdo al VII Censo Agropecuario (2007) en Punitaqui los terrenos agrícolas están destinados principalmente a cultivos de plantas forrajeras, frutales y viñas y parronales viníferos (**Figura 2.8**).

**Figura 2.8 Superficie cultivada por sector agrícola**

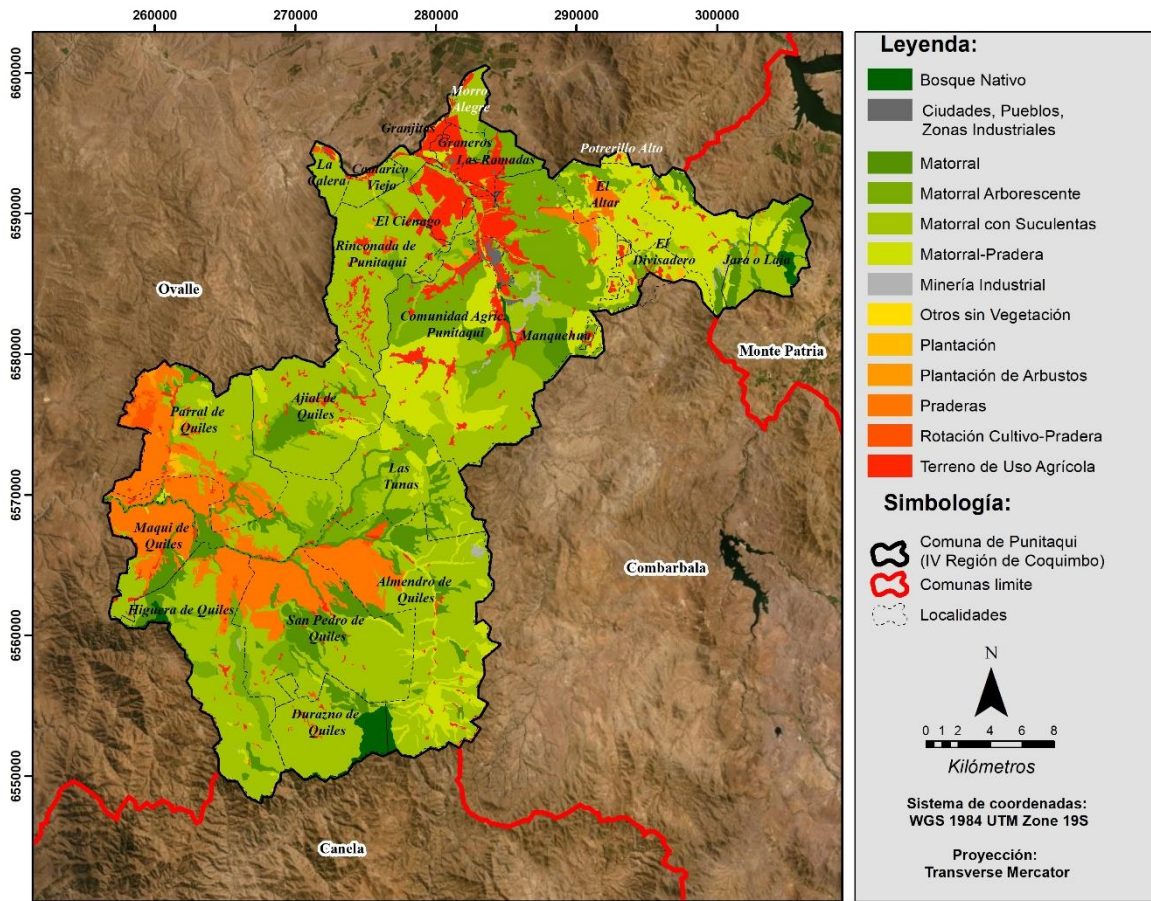


Fuente: VII Censo Nacional Agropecuario (2007)

La mayor parte de los usos de suelos destinados a actividades agrícolas se focalizan en la zona norte de la comuna coincidiendo con localidades como “Las Ramadas”, “El Cienago”, “Graneros”, “Granjitas”, etc. que se encuentran próximas al Estero Punitaqui (**Figura 2.9**.) También se desarrolla actividad orientada al agro en las tierras pertenecientes a las comunidades agrícolas, de las que existen siete en la comuna y que ocupan una extensión aproximada de 41.621 hectáreas (31% de la superficie comunal).



Figura 2.9 Usos vegetacionales y de suelo en Punitaqui:



Fuente: Elaboración propia en base a CONAF

Respecto a la vegetación, según Gajardo (1994) en la comuna hay presencia de tres formaciones: matorral estepario costero, matorral estepario interior y material estepario boscoso. (Figura 2.10).

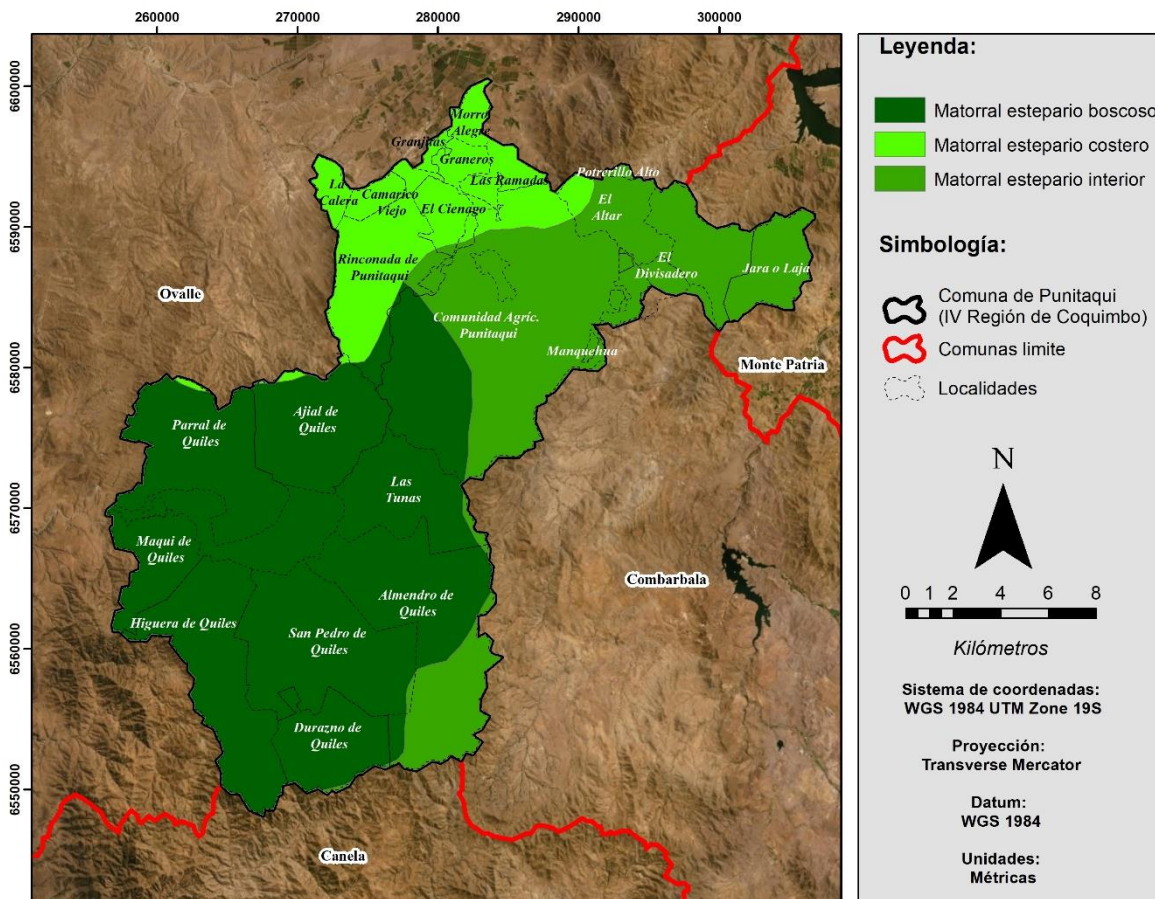
En la unidad de matorral estepario costero que se destaca por la fuerte influencia de neblinas, dominan los matorrales de *Ademia micorphylla*, *Cassia coquimbensis*, *Heliotopum stenophyllum* y *Fuchsia lycioides*, con presencia ocasional de especies amenazadas como *Myrcianthes coquimbensis*, *Porlieria chilensis*, *Carica chilensis*, *Aextoxicon punctatum* y *Myrceugenia correifolia*. (Municipalidad de Punitaqui, 2018)

El matorral estepario interior, en tanto, se caracteriza por la presencia de comunidades dominadas por *Flourensia thurifera* y *Bridgesia incisaefolia*, que ocupan los llanos y las serranías interiores, sin influencia directa de las neblinas costeras y por lo tanto con un carácter más xerofítico de la vegetación, penetrando aquí algunos elementos del desierto. Existe también la presencia de especies amenazadas como *Cordia decandra*, *Krameria cistoidea*, *Prosopis chilensis* (Municipalidad de Punitaqui, 2018).

Por último, en el matorral estepario boscoso se cuenta con la presencia de especies como *Adesmia bedwellii*, *Bahia ambrosioides*, *Bromus berterouanus*, *Colliguaja odorifera*, *Puya chilensis*, etc. (Corporación Nacional Forestal, 2016)

En la actualidad la densificación y extensión de las distintas cubiertas vegetales sobre el terreno se encuentra mermada por efecto de las actividades mineras, agrícolas, ganaderas y de pastoreo, que han generado una presión sobre el sustrato original de la zona, siendo una de las principales consecuencias la erradicación o desplazamiento de vegetación nativa, así como la pérdida de fertilidad de los suelos.

**Figura 2.10 Formaciones matorrales en Punitaqui**



Fuente: Elaboración propia en base a CONAF (2014)

## 2.2. Modelo y fuentes de datos empleados

La realización de este estudio tiene como meta establecer las cartografías de erosión actual y potencial de la comuna de Punitaqui, basándose en la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo (USLE por su acrónimo en inglés) (Wischmeier y Smith, 1978). USLE es modelo empírico de caja gris de uso bastante difundido para el cálculo de las pérdidas de suelo en cuencas hidrográficas y en específico sobre terrenos cuyo uso está destinado a la actividad agrícola (Morgan, 1997)

El modelo utiliza cinco factores para calcular la pérdida de suelo promedio para un periodo de tiempo definido: la erosividad de la lluvia (R), la susceptibilidad de erosión del suelo (K), la longitud de pendiente por el grado de pendiente (LS), el manejo de cultivos (C) y las prácticas mecánicas de conservación (P).

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

Donde;

A= Promedio de pérdida de suelo por hectárea expresado en ton/ha/año

R= Factor de erosividad de la lluvia en MJ.mm/ha<sup>-1</sup>.h<sup>-1</sup>.

K= Factor de erosionabilidad del suelo en ton\*h.MJ/cm

LS= Factor de longitud y gradiente de pendiente (adimensional)

C= Factor del manejo de vegetación (adimensional)

P= Factor de prácticas de conservación en el manejo de la vegetación agrícola (adimensional)

USLE permite predecir la pérdida de suelo en toneladas por hectárea anuales producida por la erosión laminar y de surcos. No predice la erosión en cárcavas o en las riberas de los ríos ni tampoco considera la deposición de material o incorpora alguna relación de sedimentos aportados.

El modelo toma como referencia una unidad de evaluación llamada parcela estándar la que posee una longitud de 22,13 metros sobre una pendiente uniforme de 9% en sentido longitudinal. Tales características vienen incluidas en el cálculo de los factores de erodabilidad de suelo (K) y longitud e inclinación de pendiente (LS). También puede decirse que la ecuación se desarrolló para estimar la pérdida media anual de suelo a largo plazo,

es decir no puede utilizarse para predecir las pérdidas de una tormenta aislada. (Morgan, 1997).

La obtención de los cinco parámetros se basa en fórmulas y datos de origen estadounidense, por lo que el apelativo “universal” del modelo es relativo y su aplicación en otras localidades debe considerar métodos alternativos para la obtención de los factores y que dependen de las características del área de estudio en la que se esté aplicando la ecuación. También puede mencionarse que el modelo presenta problemas teóricos puesto que la erosión de suelo no puede describirse solamente con el producto de cinco factores, ya que hay una interdependencia considerable entre las variables. Por ejemplo, la precipitación influye en los factores R y C, y el aterramiento en los factores LS y P, pero se ignoran otras interacciones, como la mayor importancia de los grados de pendiente en áreas de precipitaciones fuertes (Morgan, 1997). También puede mencionarse que la escorrentía no está considerada explícitamente en ningún factor, aunque esta indirectamente asociada en los factores R y LS.

En base a estas consideraciones, este capítulo aborda los métodos usados para dar con los factores que componen la ecuación, haciendo énfasis en las diferencias con los métodos tradicionales que se emplean en EE. UU. En esta investigación, se calcularon cuatro de los parámetros de la fórmula original (R, K, LS, C). Dado que no existen datos disponibles sobre las prácticas de control de erosión en las zonas de cultivo de Punitaqui, se optó por asignar el valor 1 al parámetro P, lo que ha sido una práctica común en varios trabajos de USLE.

A partir del resultado final se obtienen las cartografías de erosión actual y erosión potencial de la comuna. También se desprenden las cartografías de erosión actual y potencial en base a una clasificación que concuerda con la teoría de las prácticas de conservación del suelo, definiéndose áreas con pérdidas tolerables y no tolerables del recurso.

Las fuentes de datos necesarias para la elaboración de los 4 parámetros en Punitaqui son descritas a continuación:

- Datos de Precipitación:

Mediante un script de programación ejecutado en la aplicación Google Engine se generó una capa (layer) superpuesta al área de Punitaqui, que contenía los datos pluviométricos mensuales de la zona para el periodo 2000-2017 y que son propiedad de TerraClimate una dataset especializada en clima global (Abatzoglou et al, 2018). La aplicación permite seleccionar puntos dentro de un mapa, donde cada uno corresponde a conjunto de datos de precipitación dentro de un periodo señalado. En este estudio se refiere a ellos como “estaciones pluviométricas ficticias”. Se seleccionaron un total de 24 de estas estaciones, de las que se descargaron sus datos en formato Excel.

La precipitación mensual, como se describirá más adelante es uno de los insumos del Índice Modificado de Fournier (IMF) que se utiliza bastante por usuarios del Modelo USLE para el cálculo del Factor R de erosividad de la lluvia, en remplazo del método  $EI_{30}$

- Datos de Suelo:

Los datos sobre porcentajes de texturas de suelo para la zona de estudio se obtuvieron de la página SoilGrids (Heng *et al*, 2014) en formato raster, con una resolución aproximada de 218 metros. Ya que previamente se ha decidido utilizar una resolución de 30 metros para los 4 parámetros del modelo, fue necesario ocupar la herramienta Resample para obtener la resolución deseada en las 3 capas descargadas, donde cada una viene representar los porcentajes de arena, arcilla y limo del área de estudio. La información sobre textura se usa para obtener el valor de K en base a estudios previos, concretamente a partir de la clasificación de Stewart *et al* (1975) que se explica más adelante.

- Datos de Vegetación:

Para el cálculo del factor C de cobertura vegetal, se generó un Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI por su acrónimo en inglés) a partir de las bandas 4 y 5 de una imagen Landsat 8 descargada el 11 de noviembre del 2018. Un NDVI se utiliza sobretodo para medir el vigor de la biomasa vegetal en estudios relacionados a comportamientos de cultivos. Su uso difundido se da especialmente por la sencillez de cálculo, y disponer de un rango de variación (entre -1+1), lo que permite establecer umbrales y comparar imagenes (Gongaza, 2014). En este estudio se utilizó el NDVI para hacer un análisis de regresión mediante el cual se obtienen los valores del factor C, que en este estudio representa cobertura vegetal en vez de manejo de cultivos.

- Datos de topografía:

La topografía es uno de los mayores determinantes de los procesos de erosión y transporte de agua y de materiales. La totalidad de los modelos que simulan los procesos de movimiento de agua en el suelo, y los derivados de la erosión y deposición de materiales incluyen datos relativos al grado, la forma y la longitud de pendiente. En base a esto, los datos topográficos para generar el factor LS se derivan de un Modelo Digital de Elevación (DEM por sus siglas en inglés) descargado de la página web de la Misión Topográfica Radar Shuttle (SRTM por sus siglas en inglés). Un DEM es una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de la altitud de la superficie de un terreno en específico, siendo los más comunes los de estructura tipo raster (Felicísimo, 1994).

## 2.3. Cálculo de los factores del modelo USLE:

### 2.3.1. Factor erosividad de la lluvia (Factor R)

El factor R de erosividad de las precipitaciones corresponde a la sumatoria de los productos de las energías de todos los eventos de lluvia anuales con sus respectivas intensidades máximas en 30 minutos (Wischmeier & Smith, 1965), lo cual da una idea de la agresividad con la que precipitación influye en el proceso de degradación del suelo por erosión hídrica (Mancilla, 2008). Según Bascuñan (2010) para obtener un valor representativo de R se deben computar eventos de lluvia o tormentas en un ciclo de al menos 10 años.

Este parámetro tiene su origen en la investigación de Wischmeier & Smith (1958) que en base a datos sobre el tamaño de las gotas de lluvia y su velocidad terminal, desarrollaron una ecuación de regresión describiendo la energía cinética de un evento de tormenta o sección de esta (**Ecuación 2.1**):

(2.1)

$$E = 1.213 + 0.890 \log_{10} I$$

Donde;

$E$  = energía cinética en  $\text{kgm/m}^2\text{mm}$

$I$  = intensidad evento de lluvia en mm por hora

Esta ecuación se ejecuta para cada incremento de la intensidad de un evento pluviométrico por lo que el total de energía cinética se obtiene multiplicando todas las energías de todos los incrementos de intensidad.

Sendos análisis de regresión demostraron que las pérdidas de suelo por eventos de tormenta en parcelas cultivadas estaban correlacionadas al producto cruzado entre el total de la energía cinética y la intensidad máxima de la lluvia en 30 minutos (Wischmeier, 1959 citado por Mitchell & Bubenzer, 1980). Este método, conocido como  $EI_{30}$  es una medida de la manera en que la energía y la intensidad están ligadas en una tormenta y establece el efecto combinado del impacto de una gota de lluvia y la turbulencia de la escorrentía para transportar partículas de suelo desde un campo (Mitchell & Bubenzer, 1980) (**Ecuación 2.2**):

(2.2)

$$R = \left[ \sum_{j=1}^n (1.213 + \log_{10} I_j) (I_j T_j) \right] I_{30} * \frac{1}{173,6}$$

Donde:

R: erosividad de la lluvia (MJ.mm.ha<sup>-1</sup>.h<sup>-1</sup>.yr<sup>-1</sup>)

$I_j$ : intensidad de la lluvia para un incremento específico de intensidad

$T_j$ : periodo de tiempo para un incremento específico de intensidad de tormenta

$I_{30}$ : la intensidad máxima de la lluvia en 30 minutos para un evento de tormenta

$j$ : el incremento específico de tormenta

$n$ : número de incrementos de tormenta

Desafortunadamente, los datos sobre intensidades de tormenta rara vez están disponibles en estaciones meteorológicas, por lo que varias de las metodologías para la obtención del Factor R utilizan el Índice Modificado de Fournier (MFI por su acrónimo en inglés) (Arnoldus, 1980) que es un índice de agresividad pluvial o climática que considera la precipitación de todos los meses del año. (**Ecuación 2.3**):

(2.3)

$$MFI = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \left( \sum_{j=1}^{12} \frac{pi^2}{p} \right)$$

Donde:

$pi$ : precipitación mensual

$p$ : precipitación anual

Específicamente en este estudio, la erosividad de las precipitaciones es calculada por medio de la fórmula de Valenzuela & Morales (2004) que es una adaptación de un método desarrollado en las zonas áridas y semiáridas de España por el Instituto para la Conservación de la Naturaleza (ICONA) (1988). **(Ecuación 2.4)**

**(2.4)**

$$R = a + b \sum_{i=1}^{12} \frac{pi^2}{p}$$

Donde:

*R*: Erosividad de las precipitaciones

*a + b*: Coeficiente de regresión lineal.

En la ecuación “a” y “b” son coeficientes que se encuentran mediante una regresión lineal de una ecuación de R que también tiene procedencia de las zonas de España (**Ecuación 2.5.**) :

**(2.5)**

$$R = 0,291 * [PMEX]^{1.297} * [MR]^{-0.511} * [MV]^{0.366} * [F24]^{0.414}$$

Donde:

PMEX: lluvia media mensual

MR: lluvia media del periodo octubre-mayo

MV: lluvia del periodo junio-septiembre

F24= factor de concentración de la máxima lluvia diaria



El factor de regresión de la ecuación anterior da como resultado que la suma de los coeficientes “a” y “b” tienen un valor de 1,6881 por lo que la fórmula para obtener R queda expresada de la siguiente manera (**Ecuación 2.6.**):

(2.6.)

$$R = 1.6881 * \sum_{i=1}^{12} \frac{pi^2}{p} = 1.6881 * MFI$$

Como se puede ver, la ecuación anterior incorpora el MFI dentro de su cálculo, por lo que fue necesario descargar los datos pluviométricos del periodo 2000-2017. Estos fueron recopilados desde la conocida dataset TerraClimate por medio del servicio de alojamiento web Google Engine. En total se obtuvieron 24 grupos de datos de precipitación mensual distribuidos a lo largo de la comuna de Punitaqui. En Excel fueron calculados los MFI y los factores R de cada estación en base a las ecuaciones **2.3** y **3.6**.

Cada estación tenía una coordenada asociada, por lo que una vez procesados los datos en Excel fueron llevadas a ArcMap 10.3. por medio de la función *Display XY Data*, con lo cual quedan traducidas a puntos en formato shapefile. Tras esto, se obtuvo el raster del Factor R por medio de una interpolación (*Método Spline*) en base al campo “Factor\_R” de la tabla de atributos de las estaciones. El Spline (Curvas adaptativas) es uno de los métodos englobados en la clasificación de funciones radiales básicas. Con esta técnica se consiguen ajustes del terreno similares en forma, a una membrana elástica que pasa por todos los puntos de muestreo (que vienen a ser representados por las estaciones pluviométricas ficticias), minimizando la curvatura para el resto de la superficie. Los resultados de la interpolación y que ilustran la erosividad de las precipitaciones en Punitaqui se clasifican en base al trabajo de Páez (1999) (**Tabla 2.2**). A su vez, se pueden clasificar los resultados de MFI en base Michiel & Gabriel (1996) (**Tabla 2.3**):

**Tabla 2.2 Clasificación del Factor R**

<b>Factor R (MJ.mm.ha-1.h-1)</b>	<b>Clasificación</b>
Muy Bajo	≤2000
Bajo	2000-4000
Moderadamente Bajo	4000-6000
Moderado	6000-8000
Moderado Alto	8000-10000
Alto	10000-12000
Muy Alto	12000-14000
Extremadamente Alto	≥ 14000

Fuente: Páez (1999)

**Tabla 2.3 Clasificación del índice Modificado de Fournier**

<b>IFM</b>	<b>Clasificación</b>
0 -60	Muy Bajo
60 - 90	Bajo
90 - 120	Moderado
120 - 160	Alto
>160	Muy Alto

Fuente: Michiel & Gabriels (1996)

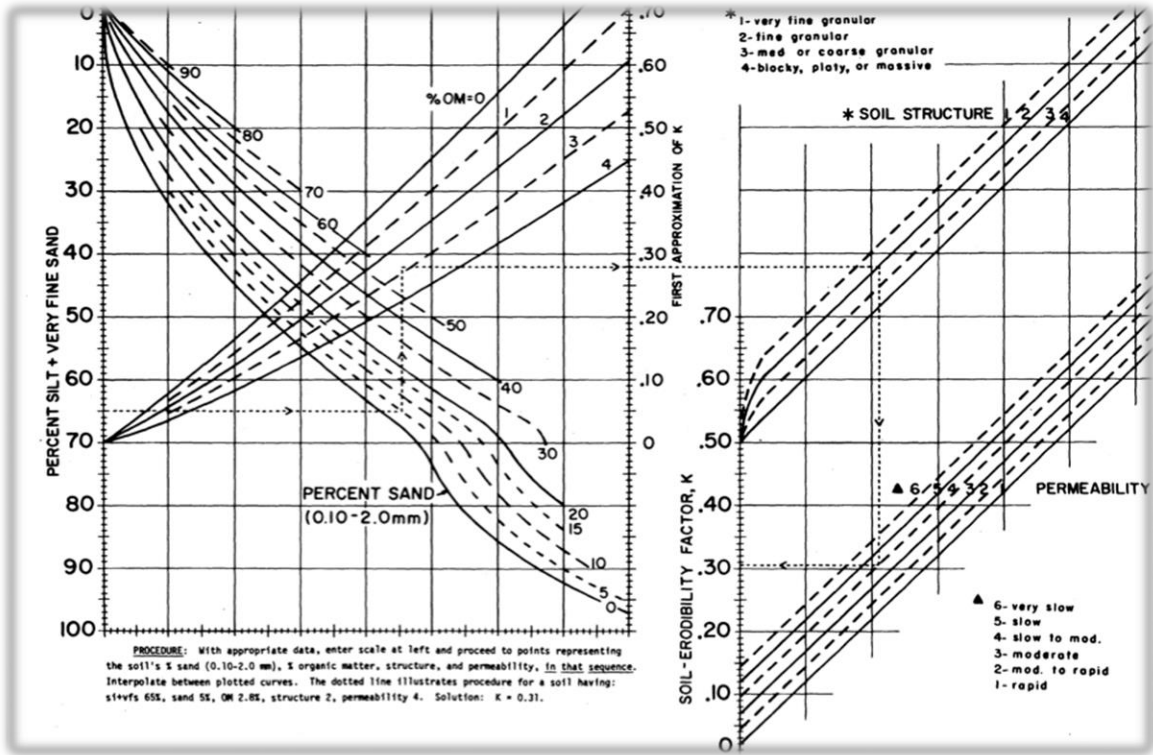
### 2.3.2. Cálculo del factor de erodabilidad del suelo (Factor K)

Como se señaló anteriormente, la erodabilidad están influida por las propiedades del suelo tales como tamaño de partículas, estabilidad de agregados, materia orgánica, cantidad y tipo de arcillas o por características edáficas que afectan la estructura de suelo y la transmisión de agua (Cisneros *et al*, 2012). El valor de K viene a reflejar la erodabilidad de un determinado suelo o la tasa de erosión para una parcela estándar con unidades de 22,13 metros de longitud y 9% de pendiente (Mitchell & Bubenzer, 1980).

Wordofa (2011) señala que el valor de este factor va desde 0.01 a 1.0 siendo los valores más altos para los suelos con alto contenido de limo o arena muy fina y los más bajos para aquellos con mayores contenidos de arcilla. Mitchell & Bubenzer (1980) afirman que las mediciones directas del factor K requieren considerable tiempo y equipamiento y además son costosas. Considerando esto es que se surgió el método del nomograma, que precisa el conocimiento previo de los valores de 5 parámetros: el porcentaje de limo (0.002-0,05

mm) más arena muy fina (0.05 mm – 0.10 mm), el porcentaje de arena, el contenido de materia orgánica, la estructura de suelo y la permeabilidad (**Figura 2.11.**):

Figura 2.11 Ejemplo de estimación de K en nomograma adaptado de Wischmeier (1971)



Fuente: Wischmeier (1971)

La utilización del nomograma precisa extraer *in situ* ciertas propiedades del suelo cuyo K se busca medir, lo que implica trabajo de campo que no fue posible de realizar durante este estudio, por lo que se optó por extraer los valores de K de la bibliografía, a partir de las clases texturales presentes en la comuna de Punitaqui.

El primer paso fue obtener en formato raster los porcentajes texturales de arena, limo y arcilla de la comuna. Estos archivos (cada uno con resolución espacial de 218 metros) se descargaron del sitio web SoilGrids y fueron procesados en las plataformas SAGAGIS 7.1.1 y en ArcMap 10.3. En la primera, se obtuvieron las clases texturales de suelo de Punitaqui mediante la herramienta "soil texture classification". Las texturas se denominaron según la clasificación del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA por sus siglas en inglés)

En la segunda se procedió a asignar el valor de erodabilidad en base a la clasificación de Stewart *et al* (1975) que establece el valor de K según la clase textural del suelo dependiendo del contenido o porcentaje de materia orgánica asociado al mismo. Esta clasificación es el resultado de mediciones realizadas hace más de 40 años sobre suelos de la parte oriental de EE. UU. No se cuenta con el detalle del contenido de materia orgánica de la comuna, así que este es asumido. En este estudio el valor de K final para cada textura presente se establece a partir del promedio de los valores de erodabilidad de la clasificación mencionada, que varía dependiendo de si el porcentaje de materia orgánica es de 0,5; 2 o 4% (**Tabla 2.4.**):

**Tabla 2.4 Factor K de erodabilidad del suelo según textura**

Clase textural	Materia orgánica(%)			Promedio de K
	0,5	2	4	
Arena	0,05	0,03	0,02	0,03
Arena fina	0,16	0,14	0,1	0,13
Arena muy fina	0,42	0,36	0,28	0,35
Areno franco	0,12	0,10	0,08	0,10
Areno franco fino	0,24	0,2	0,16	0,20
Areno-franco muy fino	0,44	0,38	0,3	0,37
Franco arenoso	0,27	0,24	0,19	0,23
Franco arenoso fino	0,35	0,3	0,24	0,30
Franco arenoso muy fino	0,47	0,41	0,33	0,40
Franco	0,38	0,34	0,29	0,34
Franco limoso	0,48	0,42	0,33	0,41
Limo	0,6	0,52	0,42	0,51
Franco arcilloso arenoso	0,27	0,25	0,21	0,24
Franco arcilloso	0,28	0,25	0,21	0,25
Franco arcilloso limoso	0,37	0,32	0,26	0,32
Arcillo arenoso	0,14	0,13	0,12	0,13
Arcillo limoso	0,25	0,23	0,19	0,22

Fuente: Elaboración propia en base a Stewart *et al* (1975)

### 2.3.3. Factor longitud y grado de pendiente (factor LS):

La inclusión de los factores topográficos agrega importantes matices en el modelo USLE; la longitud de pendiente condiciona el volumen de agua que fluye en una ladera determinada y por lo tanto el esfuerzo de corte que el flujo tiene, mientras que el grado de inclinación determina el componente de gravedad necesario para comenzar el movimiento

del flujo concentrado y otorgarle velocidad. Ambos factores pueden ser calculados simultáneamente (Mancilla, 2008).

Los efectos de la longitud y gradiente de la pendiente están representados en el modelo USLE como L y S respectivamente, y lo usual es considerarlos como un único índice topográfico (LS). En el modelo la longitud de pendiente está definida como la distancia desde el punto de origen del flujo superficial o de escorrentía hasta el punto en que la pendiente disminuye lo suficiente como para que ocurra deposición de sedimentos o dicho de otra manera, el punto en que la escorrentía entra en un canal definido. El cálculo considera la longitud de pendiente dentro del margen de una parcela estándar con 22,13 de largo (**Ecuación 2.7**):

(2.7)

$$L = \left( \frac{x}{22.13} \right)^m$$

Donde;

L: factor de longitud de pendiente

x: largo de pendiente en metros

m: proporción de erosión laminar a erosión por surcos

Smith & Wischmeier (1957) determinaron que la pérdidas de suelo están correlacionadas con una descripción parabólica del efecto de la angulosidad o gradiente de la pendiente. Normalizando esta ecuación a una parcela estándar con una pendiente de 9%, el gradiente puede ser calculado de la siguiente manera (**Ecuación 2.8**):

(2.8)

$$S = \frac{0.43 + 0.30 + 0.043s^2}{6.613}$$

Donde;

S: factor de pendiente

s: ángulo o gradiente en %

En base a estas ecuaciones, se describe el método original para el cálculo del factor topográfico en USLE (**Ecuación 2.9**):

(2.9)

$$LS = \left(\frac{x}{22.13}\right)^m (0.065 + 0.045S + 0.0065s^2)$$

Mitchell & Bubenzer (1980) señalan que el uso de la ecuación anterior está restringido para las pendientes uniformes y que el resultado de esta suele sobreestimar las pérdidas de suelo de pendientes concavas y subestimar las pérdidas de pendientes convexas. Oliveira et al (2013) cree que un aspecto que dificulta la estimación del factor topográfico para su aplicación en plataformas SIG y que produce grandes limitaciones en el uso de los modelos USLE son las dinámicas de los procesos erosivos en relieves complejos y cuencas hidrográficas, dado que el método fue diseñado principalmente para la predicción de la erosión en pendientes uniformes no considerando la concavidad o la convexidad.

En este proyecto, sin embargo, el parámetro LS fue calculado según el modelo USPED (Unit Stream Power Erosion and Deposition) (Mitasova et al, 1996). A diferencia de USLE, este método cabe en la categoría de los modelos conceptuales o semiempíricos, que se basan en la integración de modelos hidrológicos, de erosión y de transporte de sedimentos, con el fin de obtener la emisión de sedimentos a la salida de una cuenca hidrográfica (García Rodríguez *et al*, 2001 citado por Giménez, 2008).

El método en cuestión predice la distribución espacial y las tasas de deposición para un flujo de escorrentía de régimen uniforme con condiciones de exceso de precipitación uniforme. Esto asume que los procesos de erosión tienen una capacidad limitada por el transporte (Giménez, 2008). El resultado del factor LS por tanto, llega a ser equivalente al factor original en superficies planas, pero con la ventaja de ser aplicable a pendientes con geometrías complejas y donde el flujo laminar y concentrado de terrenos complejos se considera en la distribución espacial de la erosión. Mitasova *et al* (1996) define el cálculo del factor LS en USPED en base la siguiente fórmula (**Ecuación 2.10**):

(2.10)

$$LS = (M + 1) \left( \frac{\lambda_A}{22,13} \right)^m \left( \frac{\sin(0.01745 * \theta_{deg})}{0.09} \right)^n$$

Donde;

LS: topografía de distribución de flujo

$\lambda_A$ : Área de flujo contribuido de aguas arriba

$m$  y  $n$ : valores ajustables dependiendo de la susceptibilidad del suelo a la erosión y el flujo

$\theta$ : pendiente en grados

En USPED dentro del cálculo del factor topográfico, la longitud de pendiente es remplazada por lo que se conoce como el área de contribución aguas arriba ( $\lambda_A$ ) que se define como el área total de captación por encima de un punto del paisaje o una corta longitud de curva de nivel (Moore *et al*, 1991 citado por Giménez, 2008). El modelado de esta variable en USPED se realiza mediante un modelo digital de elevación (DEM), concretamente a partir de dos productos que se pueden generar de éste: dirección y acumulación de flujo (Oliveira *et al*, 2013). Las direcciones de flujo, basadas en modelos digitales de elevación, son necesarias en hidrología para determinar trayectorias de flujo, sedimentos y movimiento de contaminantes. Para determinar las áreas de drenaje o de flujo acumulado, que de paso permiten la simulación de una red hidrográfica, es necesario previamente establecer las direcciones de flujo. Respecto a los exponentes de la fórmula anterior ( $m$  y  $n$ ), estos corresponden a constantes que dependen del flujo y las propiedades de suelo.

En esta oportunidad el factor LS en Punitaqui se calculó en base a la adaptación que hizo Kim (2014) del método USPED para su aplicación en Sistemas de Información Geográfica (SIG). Se utilizó como insumo un DEM de resolución 30 metros del área de estudio descargado del sitio web del proyecto ASTER GDEM. En base a este archivo se calcularon en ArcMap 10.3 la dirección y acumulación de flujo con las herramientas de Spatial Analyst *flow direction* y *flow accumulation* respectivamente. También fue necesario obtener las pendientes en grados, lo que se hizo mediante la función *slope* de la misma caja de herramientas. Se asignaron los valores de 1,4 y 0,4 para las constantes  $m$  y  $n$  respectivamente y que fueron utilizadas en un estudio de Kim (2014) quien describe que estos valores pueden utilizarse en zonas donde hay baja susceptibilidad a la erosión por surcos.

Ya obtenidos todos los datos, el factor topográfico se obtuvo ejecutando en *Raster calculator* la fórmula propuesta por Kim (2014) (**Ecuación 2.11**):

$$LS = \text{Power} \left( \text{flujo acumulado} * \frac{[28.3]}{22.1,0.4} \right) \text{Power} \left( \frac{\text{Sin(pendiente en grados} * 0.01745)}{0.09,1.4} \right) * 1.4$$

#### 2.3.4. Cálculo del factor de cobertura de vegetación (Factor C)

El factor de manejo de vegetación recoge la influencia que la cubierta vegetal y sus residuos (sedimentos) producen frente a la fuerza erosiva de las precipitaciones, controlando no solo la energía con que impactan las gotas de lluvia sobre la superficie del suelo, sino que también la velocidad de la escorrentía superficial y la infiltración a través del perfil edáfico (Bascañan, 2010).

Para Mitchell & Bubenzer (1980). El factor de manejo de cultivo representa la relación entre la pérdida de suelo en un cultivo específico y la pérdida en un suelo desnudo. Este factor incluye los efectos vinculados de uso de suelo, secuencia de los cultivos, nivel de productividad, duración de la temporada de crecimiento, prácticas culturales, manejo de residuos y distribución de las lluvias

Morgan (1997) señala que como las pérdidas de suelo varían con la erosividad y la morfología de la cubierta vegetal, es necesario tener en cuenta los cambios que se producen en éstas a lo largo del año para obtener el valor anual de C. El año se divide en periodos correspondientes a las etapas de desarrollo del cultivo: (I) barbecho, (II) siembra, (III) establecimiento, (IV) desarrollo, (V) madurez y (VI) residuos y rastrojos.

Para un cultivo dado se obtienen valores por separado para cada periodo, a partir de tablas que resumen los datos recopilados durante muchos años por el *United States Conservation Service* en estaciones experimentales. Los valores son distintos no solo para cada tipo de cultivo sino que para un mismo cultivo varían con los rendimientos, la densidad de siembra o plantación y el cultivo anterior. Los valores individuales para cada período se ponderan de acuerdo con el porcentaje de la lluvia media anual que cae en ese período y se suman para dar el valor anual (Morgan, 1997). Dado que el método descrito solo permite determinar el valor del factor C para rotaciones de cultivos y prácticas agrícolas de Estados Unidos y que para otros países, no existe información detallada para el cálculo de este factor, es que se optó por una metodología de percepción remota para obtener la cobertura vegetal en Punitaqui.

La relación que existe entre los valores estandarizados de C y los del conocido Índice de Diferencia Normalizada de Vegetación (NDVI por su acrónimo en inglés) (Rouse *et al*, 1974) ha sido deducida por variados autores, que han usado lo que se conoce como análisis de regresión para calcular los valores de C en los distintos tipos de coberturas para un área de



estudio determinada. Según mencionan Patil & Sharma (2013), el objetivo de un análisis de regresión es estimar por medio de un modelo matemático los valores desconocidos de una variable dependiente basándose en los valores de una variable independiente. En base a esto se tiene que las ecuaciones lineares o no lineares para el cálculo del parámetro C son construidas mediante un análisis de correlación entre los valores de un NDVI y los valores de "C" que han sido asignados en sendos estudios de USLE. Las cifras originales de este modelo para "C" se expresan en un rango de 0-1, donde los valores cercanos a "0" corresponden suelo cubierto, y los cercanos a "1" representan suelo desnudo.

El NDVI identifica áreas vegetadas y no vegetadas en base a la reflectancia de las plantas en las regiones rojo e infrarrojo del espectro electromagnético y sus valores van entre -1 a +1, siendo los valores negativos los que denotan cuerpos de agua, nieve, suelo desnudo o zonas urbanas, en tanto que los valores positivos o cercanos a la unidad asemejan áreas vegetadas. (Grauso *et al*, 2018)

En el cálculo del factor C de RUSLE se utilizaron unas imágenes satelitales Landsat 8 obtenidas el 11 de noviembre del 2018, a partir de las cuales se generó un NDVI del área de estudio (**Ecuación 2.13**):

(2.13)

$$NDVI = \frac{NIR - red}{NIR + red}$$

Donde:

*NIR*: Banda infrarroja (*Banda 5 en Landsat 8*)

*red*: Banda roja (*Banda 4 en Landsat 8*)

Tras este paso, se aplicó una operación condicional al NDVI en ArcMap 10.3. mediante la herramienta *Raster calculator* para dejar el rango de valores del índice en positivo (entre 0 y 1). Esta operación se expresa de la siguiente manera (**Ecuación 2.14**):

(2.14)

$$NDVI \text{ (valores rectificados)} = \text{Con}("NDVI", 0, "NDVI", "value \leq 0")$$

Luego se aplica la ecuación de regresión propuesta por Patil y Sharma (2013) y Karaburun (2010) utilizando el NDVI corregido (cuyo rango va 0 y 0.62) (**Ecuación 2.15**):

(2.15)

$$\text{Factor } C = 1.02 - 1,21 * NDVI$$

Con resultado de esto que arroja un rango valores entre 0.26 y 1.02 se se ejecutó una última operación condicionante para que el rango de valores coincidiera con el corresponde al factor C que ronda entre 0 y 1. Esta operación viene expresada de la siguiente forma (**Ecuación 2.16**):

(2.16)

$$\text{Factor } C \text{ final} = \text{Con}(\text{"factor } C", 1, \text{"factor } C", \text{"value } \geq 1")$$

Tras esto se obtiene , el factor C de la comuna de Punitaqui, donde los valores cercanos mas cercanos a 0 significan la presencia de coberturas vegetadas, mientras que los cercanos a 1 denotan superficies desprovistas de vegetación en su mayor medida.

### 2.3.5. Cálculo de la erosión hídrica actual y potencial en Punitaqui

Una vez obtenidos los 4 parámetros, se generaron dos resultados por medio de álgebra de mapas usando el módulo *Raster Calculator* de la paquetería ArcGIS 10.3: El primero de ellos consiste en el mapa de erosión hídrica actual que ilustra las pérdidas de suelo en toneladas por hectárea anuales considerando el efecto de cubierta de la vegetación. El segundo resultado en tanto es la erosión hídrica potencial que ilustra las pérdidas de suelo en caso de que la cobertura vegetal desapareciese. Para ambos casos los resultados se categorizaron en erosión de tipo leve, moderada, alta y muy alta en base a FAO (1980) (**Tabla 2.5.**):

**Tabla 2.5 Clasificación de la erosión hídrica según pérdidas de suelo en ton/ha/año**

Grado de erosión	ton*ha*año
Leve	10
Moderada	10 - 50
Alta	50 - 200
Muy Alta	>200

Fuente: Elaboración propia

También se estimó, estimó la erosión actual y potencial en base a las categorías “tolerable” y “no tolerable” lo que se desprende de la teoría sobre prácticas de conservación del suelo. Según Kirby (1980) las tasas aceptables de pérdidas de suelo se ubican en un tramo de 0 -24,71 toneladas/hectárea/anuales. Superado este rango, el ritmo de meteorización química que forma nuevo suelo se ve sobrepasado (**Tabla 2.6**):

**Tabla 2.6 Clasificación de las pérdidas de suelo en base a las prácticas de conservación**

Grado	ton/año
tolerable	0 - 24,71
no tolerable	>24,71

Fuente: Elaboración propia en base a Kirby (1980)

Una síntesis del modelo utilizado así como varios de los insumos utilizados para su elaboración pueden ser apreciados en la sección de **Anexos**

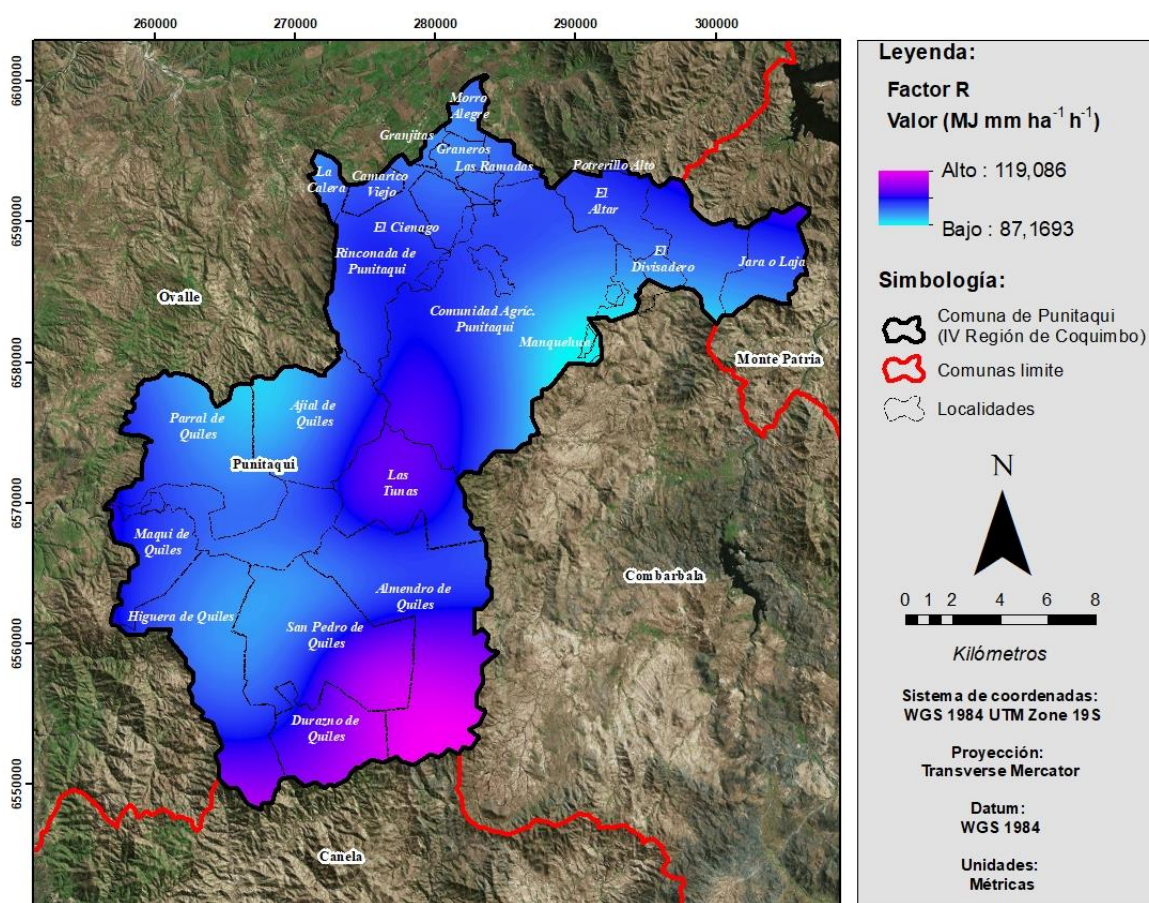
### 3. Resultados

#### 3.1. Análisis de los parámetros obtenidos

##### 3.1.1. Factor R

Para la elaboración del factor R de erosividad de las precipitaciones se trabajó con los datos pluviométricos mensuales de Punitaqui del periodo 2000-2017, descargados de TerraClimate. Se procesaron en total 24 conjuntos de datos, los que vienen a representar estaciones pluviométricas ficticias. En Excel, se calculó por cada estación tanto el MFI como la erosividad mediante las fórmulas 2.3. y 2.6. (**capítulo 2, sección 2.3.1.**). Como las estaciones tenían una coordenada asociada, estas fueron llevadas a la plataforma ArcMap 10.3 mediante *Display XY Data*, lográndose la espacialización de la erosividad mediante la interpolación (*spline*) del factor R asociado a cada estación (**Figura 3.1.**):

**Figura 3.1** Factor R de erosividad de las precipitaciones en Punitaqui (2000-2017)



Fuente: Elaboración propia en base a TerraClimate

Como se puede apreciar en el mapa anterior, la erosividad se concentra durante los años de estudio en las localidades de Durazno de Quiles, Almendro de Quiles, San Pedro de Quiles, así como en sectores de “Las Tunas” y “Comunidad Agrícola de Punitaqui”. Aun así y en base a las clasificaciones usadas, los resultados de agresividad y erosividad de las precipitaciones se consideran bajos (**Tabla 3.1.**)

**Tabla 3.1 Resultados MFI y Factor R por estación pluviométrica ficticia**

Estación pluviométrica	IMF	Clasificación IMF (Michiel & Gabriel, 1996)	Factor R	Clasificación Factor R Páez (1999)
1	59,07	Muy Bajo	99,72	Muy bajo
2	57,55	Muy Bajo	97,16	Muy bajo
3	56,77	Muy Bajo	95,83	Muy bajo
4	59,07	Muy Bajo	99,72	Muy bajo
5	58,64	Muy Bajo	98,99	Muy bajo
6	59,93	Muy Bajo	101,16	Muy bajo
7	57,98	Muy Bajo	97,87	Muy bajo
8	63,08	Bajo	106,49	Muy bajo
9	57,77	Muy Bajo	97,52	Muy bajo
10	66,07	Bajo	111,53	Muy bajo
11	59,77	Muy Bajo	100,90	Muy bajo
12	64,65	Bajo	109,13	Muy bajo
13	57,59	Muy Bajo	97,21	Muy bajo
14	59,07	Muy Bajo	99,72	Muy bajo
15	58,84	Muy Bajo	99,33	Muy bajo
16	66,07	Bajo	111,53	Muy bajo
17	59,93	Muy Bajo	101,16	Muy bajo
18	57,18	Muy Bajo	96,52	Muy bajo
19	57,99	Muy Bajo	97,90	Muy bajo
20	57,63	Muy Bajo	97,29	Muy bajo
21	60,66	Bajo	102,41	Muy bajo
22	57,97	Muy Bajo	97,86	Muy bajo
23	59,77	Muy Bajo	100,90	Muy bajo
24	56,93	Muy Bajo	96,11	Muy bajo

Fuente: Elaboración propia

Hay que recordar que Punitaqui está influenciado por un clima semiárido de lluvia invernal, en el cual las lluvias se presentan escasas e irregulares. De hecho, durante el periodo 2000-2017 el promedio de precipitaciones a nivel mensual apenas rondo los 12,1 mm, cayendo más del 70% de las lluvias en el trimestre de junio, julio y agosto. A nivel anual para el mismo periodo el promedio fue de tan solo de 12,48 mm.

Incluso con la apariencia de un régimen pluvial débil y marcadamente estacional, esto no sugiere que durante el periodo no hayan ocurrido eventos de intensos aguaceros, aunque por desgracia la ausencia de estos datos no permitió la utilización de la fórmula original del factor R, basada en el índice de erosión pluvial desarrollado por Wischmeier & Smith (1958).

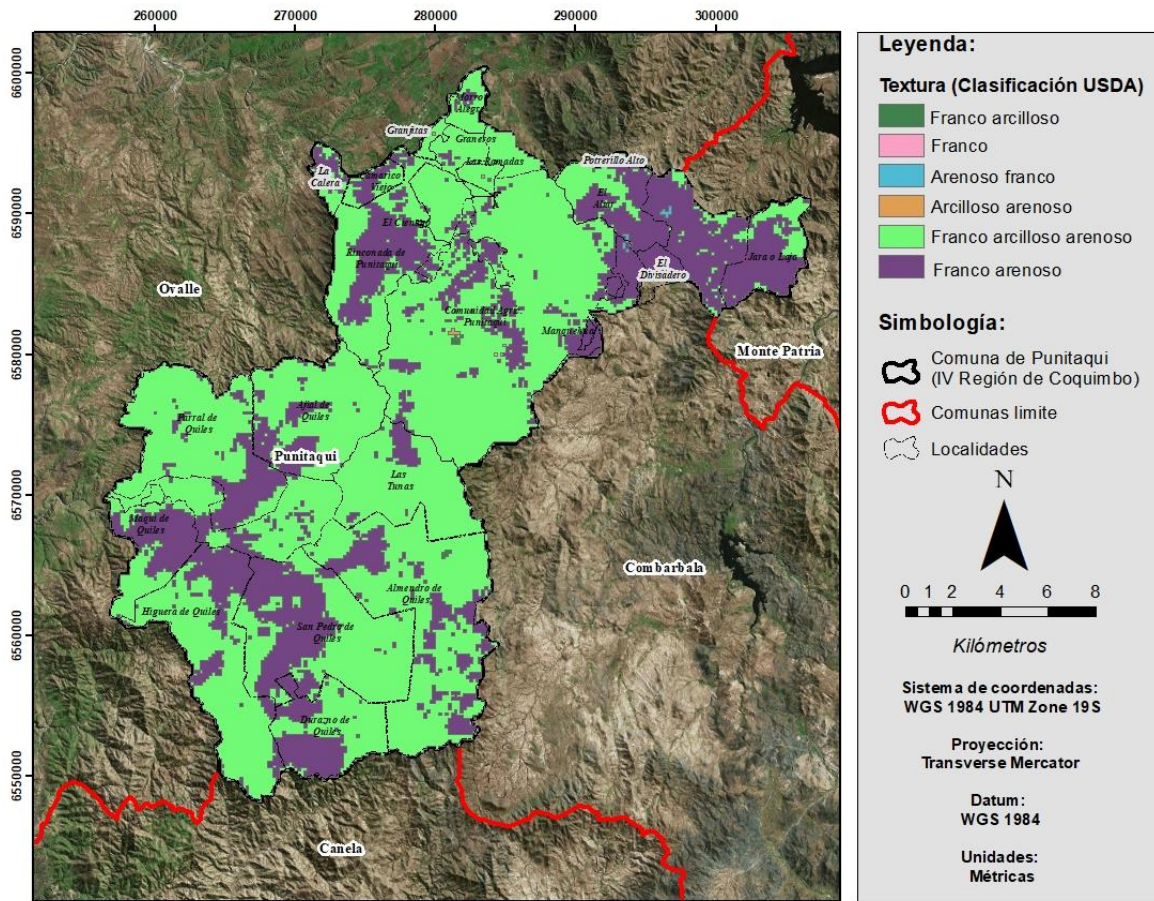
De todas formas, se pueden hacer relaciones entre el parámetro R resultante y el resto de los elementos que componen el modelo USLE. Por ejemplo, la distribución de la erosión por salpicadura puede coincidir con las zonas de pendientes más pronunciadas, o específicamente aquellos sectores donde los valores del parámetro de longitud y grado de

pendiente (Factor LS) son mayores. Como remarca Ellison (1944) citado por Evans (1980) la salpicadura se vuelve más efectiva como proceso en tanto la pendiente se inclina e incluso cuando la velocidad de los vientos aumenta. Puede decirse igualmente que los mayores desprendimientos ocurrirían en los suelos con texturas de tipo Franco arenoso donde a la vez el riesgo de formación de costra superficial es mayor, lo que reduce la infiltración de las aguas en el perfil edáfico, promoviendo la formación de escorrentía. Se puede también aventurar un mayor desprendimiento de partículas en los terrenos donde los valores del factor C, que representa el nivel de cobertura vegetal, se acercan a 1, es decir suelo desnudo, lo que implica superficies que no cuentan con una barrera protectora contra el impacto de las gotas de lluvia.

### 3.1.2. Factor K

El cálculo del factor K de erodabilidad de los suelos se basó en la clasificación de Stewart *et al* (1975) que asigna valores de erodabilidad de los suelos en base a la clase textural y al contenido porcentual de materia orgánica. Para ocupar aquellos datos fue preciso transformar en SAGAGIS 7.1.1., los datos *raster* con los porcentajes de arena, limo y arcilla a clases texturales. El resultado de esto arrojó que la mayor parte de los suelos en Punitaqui corresponden a texturas del tipo Franco arcilloso arenoso y Franco arenoso (**Figura 3.2**):

Figura 3.2 Clases texturales en Punitaqui:



Fuente: Elaboración propia en base a SoilGrid

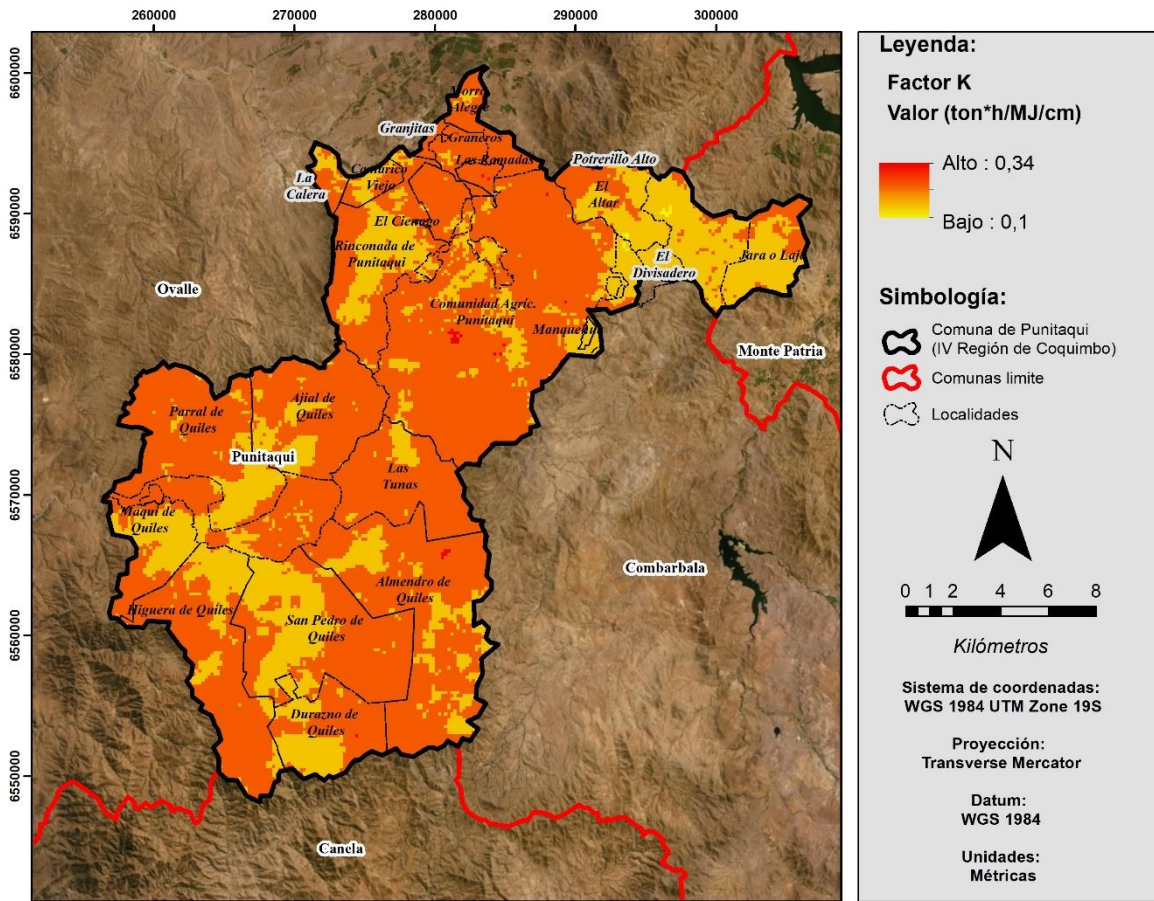
Como no se pudo disponer de los datos porcentuales de materia orgánica por clase textural, estos son asumidos. En la clasificación ocupada, un suelo con una textura determinada puede poseer un valor de K distinto dependiendo de si el contenido de materia orgánica corresponde de 0,5, 2 o 4%. En este trabajo, el promedio de cada uno de estos valores representa la erodabilidad según clase textural (Tabla 3.2., Figura 3.3.):

Tabla 3.2 Valores de K por clase textural, comuna de Punitaqui

Clase textural	Valor de K en base a contenido de materia orgánica (%)			Valor K (ton*h/MJ/cm)
	0,5	2	4	
Franco arcilloso	0,28	0,25	0,21	0,25
Franco	0,38	0,34	0,29	0,34
Arenoso franco	0,12	0,1	0,08	0,1
Arcillo arenoso	0,14	0,13	0,12	0,13
Franco arcilloso arenoso	0,27	0,25	0,21	0,24
Franco arenoso	0,27	0,24	0,19	0,23

Fuente: Elaboración propia en base a Stewart et al (1975)

Figura 3.3 Factor K de erodabilidad del suelo en Punitaqui



Fuente: Elaboración propia

Según estos resultados, se tiene que la mayor erodabilidad se presenta en texturas de tipo Franco, suelos que son escasos en el territorio, en comparación al dominio de los que poseen texturas de tipo Franco arcilloso arenoso y Franco arenoso. Como se ha señalado previamente, los suelos con texturas arenosas presentan buena infiltración, pero son poco resistentes al desprendimiento que producen las aguas, ya sea por salpicadura o escorrentía. Hay que considerar de todos modos que estas superficies presentan mayor susceptibilidad a la formación de costras en eventos de lluvias intensas. En contrapartida suelos con contenidos altos de arcilla debieran presentar menor erodabilidad debido a la mayor resistencia de sus agregados, lo que se debe a sus propiedades minerales, aunque se considera que en ellos la infiltración de las aguas es dificultosa.

El comportamiento de la arcilla es muy relativo dependiendo de la zona de estudio. Por ejemplo, la estabilidad de los agregados depende del tipo de material arcilloso presente. Se puede mencionar por ejemplo que agregados compuestos por illita y esmectita forman agregados de forma rápida, pero su estructura cristalina más abierta y las mayores



dilataciones y contracciones que se producen con la humectación y desecación hacen sus agregados menos estables que los formados con caolinita. Por lo tanto, a diferentes tipos de arcillas se tienen comportamientos disimiles en cuanto a su resistencia a la erosión lo que está influenciado por las interacciones entre humedad y la composición química de las partículas (Morgan, 1997).

Considerando las ventajas o desventajas asociadas a las texturas predominantes en la comuna, se puede afirmar los agregados de cualquier suelo se vuelven más susceptibles al desprendimiento conforme aumentan los valores de pendiente. Como señala Leon (2001) al irse inclinando el terreno suelos sueltos y ligeros son más propensos a la separación o desplazamiento del lugar que ocupan por efecto de cualquiera de los agentes de erosión. En base a esto, se puede asumir que en la comuna la erosión hídrica se distribuye en aquellos suelos donde existe una coincidencia entre texturas de tipo Franco arenoso o Franco arcilloso arenoso y los valores más altos del factor LS, que en este estudio en particular, refleja la distribución de los flujos de agua sobre la superficie.

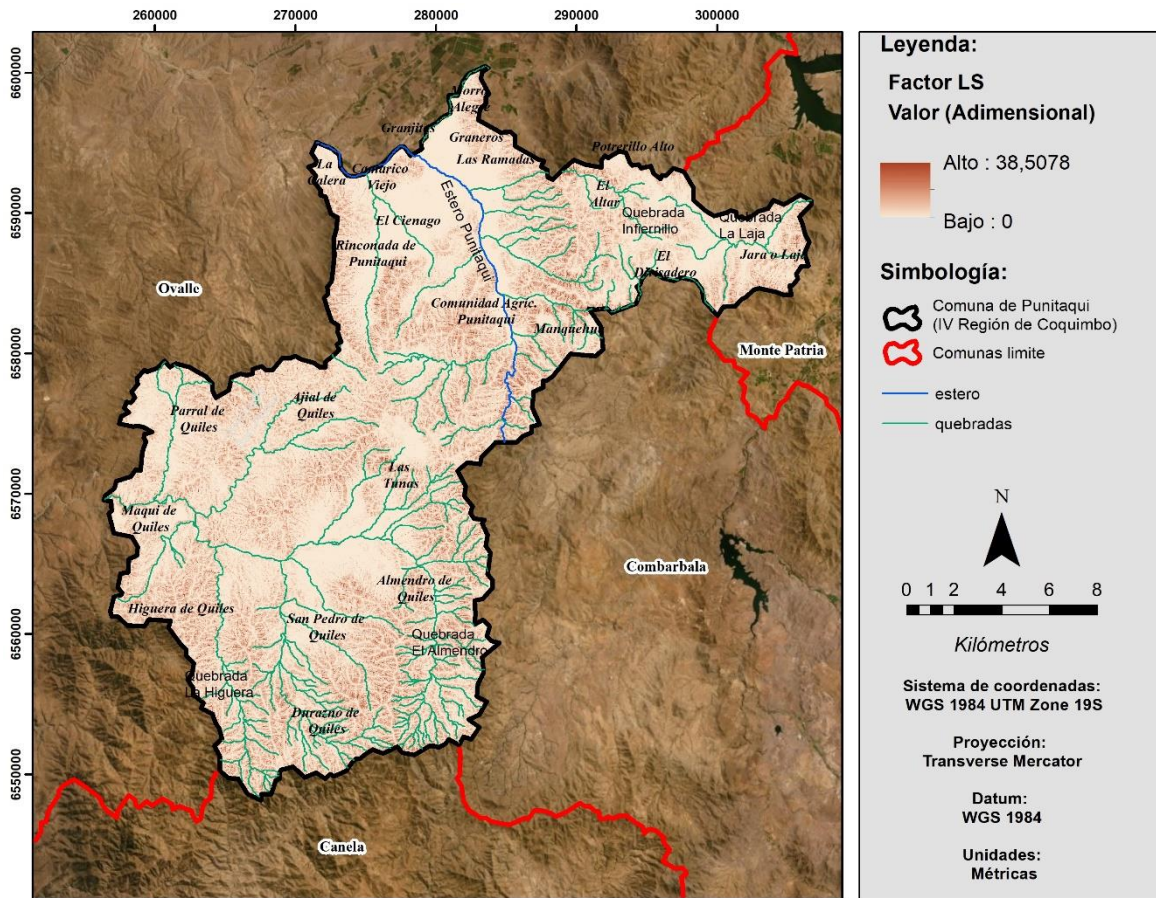
### 3.1.3. Factor LS

El factor topográfico en la ecuación original de USLE mide los efectos específicos de la topografía sobre la erosión del suelo, como el producto de la longitud de pendiente (L) y la inclinación o gradiente de pendiente (S) lo que queda sintetizado en el factor LS cuya ecuación original calcula simultáneamente ambas variables. Aun así su aplicabilidad está restringida a pequeñas escalas espaciales y asume que las pendientes son uniformes (Van Remortel et al 2001 citado por Giménez, 2008).

Mitchell & Bubenzer (1980) señalan que de emplearse la fórmula original en topografías complejas, los resultados tienden a sobreestimar la erosión en pendientes cóncavas y subestimar la que ocurre en pendientes convexas. Considerando esto es que se optó por la metodología de la USPED (Mitasova *et al*, 1996) que previamente, fue descrito como un método alternativo al USLE, que predice la distribución espacial de la erosión, así como las tasas de deposición bajo condiciones de flujo superficial uniforme y representa el cambio en la capacidad de transporte según la dirección de flujo.

Como se sabe los incrementos en la capacidad de transporte se derivan de un aumento de la quinta potencia de la velocidad de flujo por lo que si la velocidad de escorrentía se duplica la cantidad de material de determinado tamaño que puede ser transportado puede aumentar hasta 32 veces (León, 2001) (**Figura 3.4.**):

Figura 3.4 Factor LS de topografía en Punitaqui



Fuente: Elaboración propia

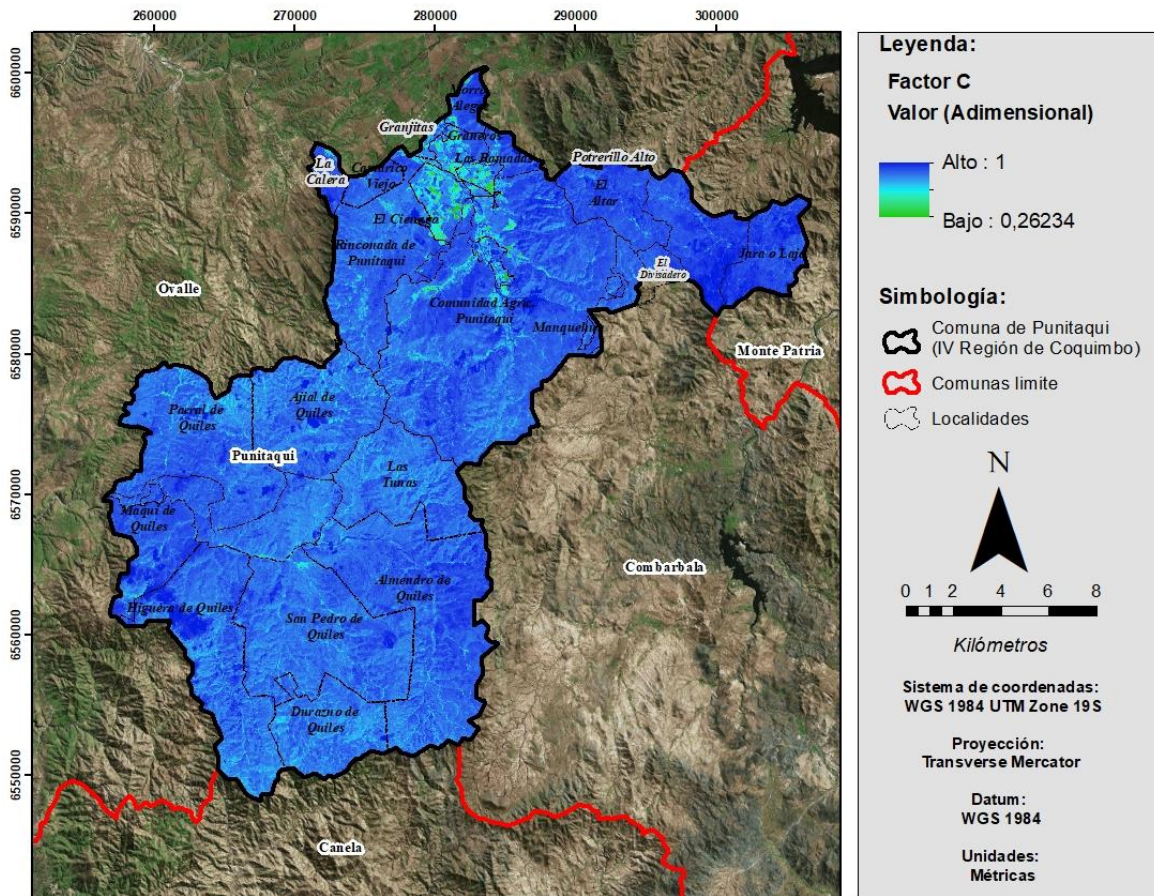
En capítulos anteriores se caracterizó al estero de Punitaqui como un sistema hidrográfico cuyos drenes se encuentran la mayor parte del año secos y cuyo mayor caudal ocurre entre los meses de julio y septiembre. Es en esta época del año donde puede existir la mayor contribución de la escorrentía como agente erosivo, en especial en las localidades aledañas al estero Punitaqui.

Los resultados de la aplicación metodología USPED arrojan que los niveles más altos del parámetro de LS se presentan en las zonas de quebradas. Se pueden mencionar 4 zonas de quebradas de norte a sur: Quebrada Laja; Quebrada El Infiernillo; Quebrada el Almendro y la Quebrada La Higuera que coinciden con las localidades donde la erosividad de las precipitaciones es más alta.

### 3.1.4. Factor C

El factor C de cobertura vegetal refleja originalmente dentro del modelo USLE, la relación entre la pérdida de suelo en un cultivo dado y la que se produce en ese mismo suelo en condiciones de desnudez. El factor C en Punitaqui se obtuvo mediante análisis de correlación con los datos de un NDVI y los valores de C que frecuentemente se asignan a suelo desnudo y superficies vegetadas, por lo que viene a representar la cobertura vegetal y no el manejo de cultivo como el parámetro original (**Figura 3.5**):

**Figura 3.5** Factor C de cobertura vegetal en Punitaqui



Fuente: Elaboración propia

La cobertura vegetal de un territorio, como se ha señalado previamente se constituye como una barrera efectiva ante la erosión hídrica en tanto protege del impacto de las gotas de lluvia y regula las velocidades de los flujos de agua, así como favorece los procesos de infiltración. El estado de la vegetación es crítico en la zona, lo que es atribuible a actividades de larga data relacionadas al sector agropecuario.

Como se sabe, la comuna de Punitaqui ha orientado su vocación económica en función del sector agrícola (en especial tras la construcción del Canal Derivado Punitaqui y la decadencia del rubro minero) dada las condiciones del agroclima Ovalle que influencia la zona entre los ríos Limarí y Choapa y que presenta aptitudes agrícolas para cultivos tradicionales, extensivos e intensivos y bajo invernadero (Novoa y Villaseca, 1989 citado por Novoa, 2001). Como destaca Jorquera (2001) el perfeccionamiento tecnológico en la región permitió la ocupación de espacios previamente impensados para la explotación agrícola. El desarrollo de sistemas de riego tecnificado, particularmente para zonas áridas, aumentó la eficiencia en el uso de los recursos hídricos e incorporó nuevos espacios a la producción, todo esto en un contexto de auge de la agricultura de exportación. Aun así, es el uso de esta tecnología la que ha llevado al casi total desmonte de la vegetación autóctona tanto en la zona de fondos de valle como en las denominadas tierras marginales, interrumpiendo ciclos reproductivos e impidiendo la regeneración natural. Puntualmente en Punitaqui, el impacto agrícola ha afectado casi el 90% de su territorio por el sistema de “lluvias” así como las actividades de las comunidades agrícolas (Jorquera,2001). Este impacto en su vertiente más grave se ha focalizado en las localidades al norte de la comuna como “La Calera”, “El Cienago”, “Rinconada de Punitaqui”, “Morro alegre”, “Las Ramadas”, “Graneros” así como también en ciertos sectores próximos hacia el sur, alrededor de “Rinconada de Punitaqui”. En cuanto al impacto atribuible al pastoreo este ha sido grave en casi toda la comuna, salvo en las comunidades hacia el este, que limitan con la comuna de Monte Patria, como por ejemplo “El Altar”, “Jara o Laja” y “Manquehua”.(Jorquera,2001)

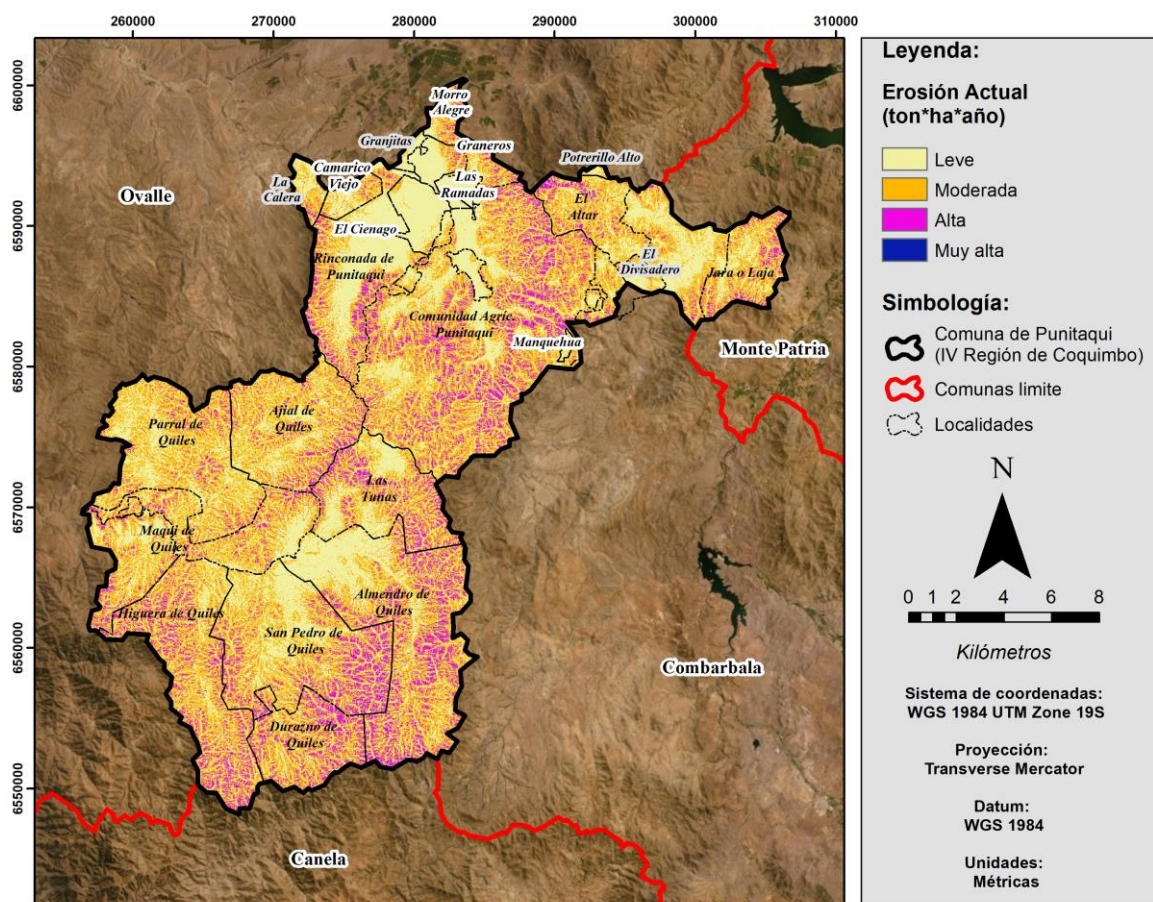
Por contrapartida, los valores más bajos del parámetro resultante se concentran en el sector norte de la comuna coincidiendo con las localidades previamente mencionadas, donde gran parte de los terrenos corresponden a praderas, superficies de matorrales o a suelos con actividad agrícola. (Corporación Nacional Forestal, 2016). Los valores altos o cercanos a 1 denotan menor presencia de vegetación o próximos a suelo desnudo, lo que se da con mayor envergadura en las localidades de Jara, el Altar y el Divisadero, aunque en general toda la comuna adolece del elemento de cubierta vegetal, lo que la vuelve en teoría más susceptible a los factores erosivos como el agua, hecho que puede exacerbarse en topografías complicadas así como en suelos donde las texturas no favorecen la infiltración.

### 3.2. Erosión Hídrica en Punitaqui

Una vez calculados los cuatro parámetros que componen el modelo USLE en este estudio, se obtuvieron las cartografías de erosión hídrica actual y potencial, que vienen a reflejar las pérdidas en toneladas por hectárea anuales producidas por la erosión laminar y de surcos.

La erosión hídrica actual (**Figura 3.6**), se obtuvo en base a los factores R, K, LS y C y refleja las condiciones de erosión dentro de un periodo de 18 años (2000-2017). En promedio, en la zona se generan pérdidas de 22,40 toneladas/hectárea/anuales de suelo.

Figura 3.6 Erosión Hídrica Actual en Punitaqui



Fuente: Elaboración propia

En general las zonas con mayor erosión bajo las condiciones actuales del paisaje son en orden decreciente las localidades de Comunidad Agrícola de Punitaqui; Almendro de Quiles; San Pedro de Quiles; Higuera de Quiles; Parral de Quiles, Las Tunas. Se establecen categorías de erosión en base a la clasificación de FAO (1980) (**Tabla 3.3**):

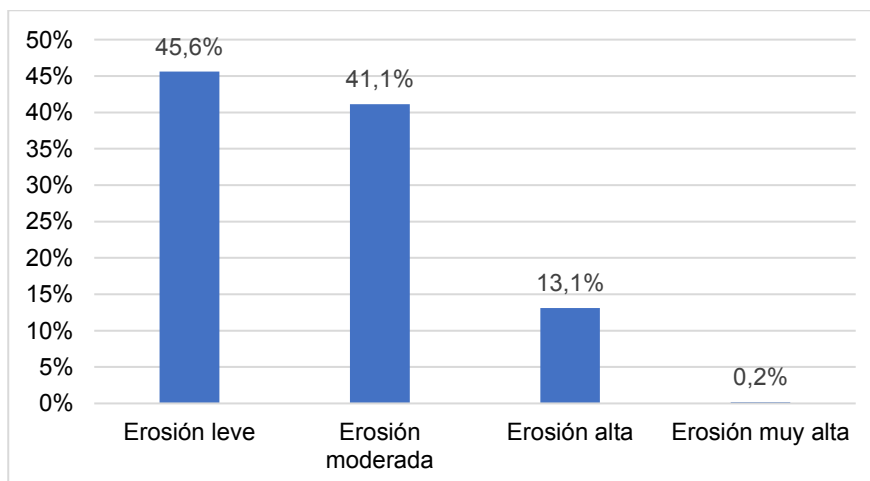
**Tabla 3.3 Superficie afectada por Erosión Hídrica Actual en Punitaqui**

Localidad	Superficie en Hectáreas					Erosión (%)
	Erosión leve	Erosión moderada	Erosión alta	Erosión muy alta	Total general	
Ajial de Quiles	2785,03	3154,46	638,16	3,95	6581,60	6,4%
Almendo de Quiles	5302,26	4552,86	2094,59	39,09	11988,80	11,6%
Camarico Viejo	474,45	296,87	45,45	0,00	816,77	0,8%
Comunidad Agríc. Punitaqui	9209,60	9914,30	3560,04	67,81	22751,75	22,0%
Durazno de Quiles	1331,31	1909,51	948,87	18,15	4207,85	4,1%
El Altar	3444,31	2634,49	411,68	4,06	6494,55	6,3%
El Cienago	1354,33	97,63	6,41	0,00	1458,37	1,4%
El Divisadero	679,11	579,76	80,30	1,16	1340,34	1,3%
Graneros	796,70	187,59	40,40	0,00	1024,69	1,0%
Granjitas	268,25	11,51	0,00	0,00	279,76	0,3%
Higuera de Quiles	2889,03	3884,65	1460,69	17,13	8251,51	8,0%
Jara o Laja	1130,81	1321,44	342,32	2,48	2797,05	2,7%
La Calera	425,35	297,71	42,10	0,36	765,53	0,7%
Las Ramadas	467,22	6,52	0,06	0,00	473,80	0,5%
Las Tunas	2478,92	2120,53	847,67	9,68	5456,81	5,3%
Manquehua	82,45	41,05	0,98	0,00	124,48	0,1%
Maqui de Quiles	1495,42	1384,69	293,12	3,09	3176,32	3,1%
Morro Alegre	365,97	360,89	97,25	0,09	824,20	0,8%
Parral de Quiles	3698,87	3857,73	501,85	2,09	8060,53	7,8%
Potrillo Alto	70,08	38,66	1,35	0,00	110,09	0,1%
Rinconada de Punitaqui	3955,67	1893,89	631,65	8,21	6489,42	6,3%
San Pedro de Quiles	4361,25	3877,86	1468,40	25,51	9733,03	9,4%
<b>Total general</b>	<b>47066,41</b>	<b>42424,64</b>	<b>13513,34</b>	<b>202,87</b>	<b>103207,26</b>	<b>100%</b>

Fuente: Elaboración propia

En cuanto a la extensión de la erosión en miles de hectareas por categoría, existe un claro dominio de los grados leve (45,6%) y moderado (41,1%) (**Figura 3.7.**):

**Figura 3.7 Porcentajes de erosión hídrica actual en Punitaqui, por categorías**



Fuente: Elaboración propia

En general la distribución de la erosión está regida por los altos valores de los parámetros LS y C respectivamente, o dicho de otro modo, la mayor erosión se produce cuando los

valores de la topografía son altos y coinciden con las áreas donde los valores de cobertura vegetal tienden a 1 o suelo desnudo.

La influencia de los factores de erosividad (R) y erodabilidad (K) es ambigua, sobretodo en el caso del primero. Como se ilustra previamente Punitaqui se destaca por su escasísima pluviometría, típica de un clima semiárido de lluvia invernal, y donde las series históricas muestran que el comportamiento de la precipitación media mensual y anual no ha hecho sino decrecer con el correr de los años. Vale recordar que el cálculo del factor R se basó en el Índice Modificado de Fournier que refleja la agresividad climática o de las precipitaciones mediante datos de precipitación mensual. En esta oportunidad y durante un periodo de 18 años, la mayor agresividad de las lluvias se presentó en ciertas localidades al sur de la comuna como “Durazno de Quiles”, “Almendro de Quiles”, “San Pedro de Quiles” o de la zona centro como “Las Tunas” y “Comunidad Agrícola de Punitaqui”. Al calcular la erosividad de la lluvia por estación pluviométrica en base a la fórmula de Valenzuela y Morales (2004) lo que se obtuvo fue una exageración de los resultados de los MFI por estación o localidad y que son consistentes con las unidades de medida propuestas por Wischmeier & Smith (1958). Aun así, la totalidad de los valores de agresividad climática, así como de erosividad de precipitaciones son bajos o muy bajos de acuerdo a las clasificaciones de Michiel & Gabriel (1996) y Páez (1999). Como no se cuenta con el detalle histórico de eventos de tormenta, solo se puede aventurar que las precipitaciones tienen mayor influencia en la erosión del área de la que se puede suponer, esto debido a la desprotección de los suelos y las fuertes pendientes. Esta influencia es más factible de manifestarse en los meses de invierno, concretamente en el trimestre de junio, julio e invierno, época en la que cae más agua.

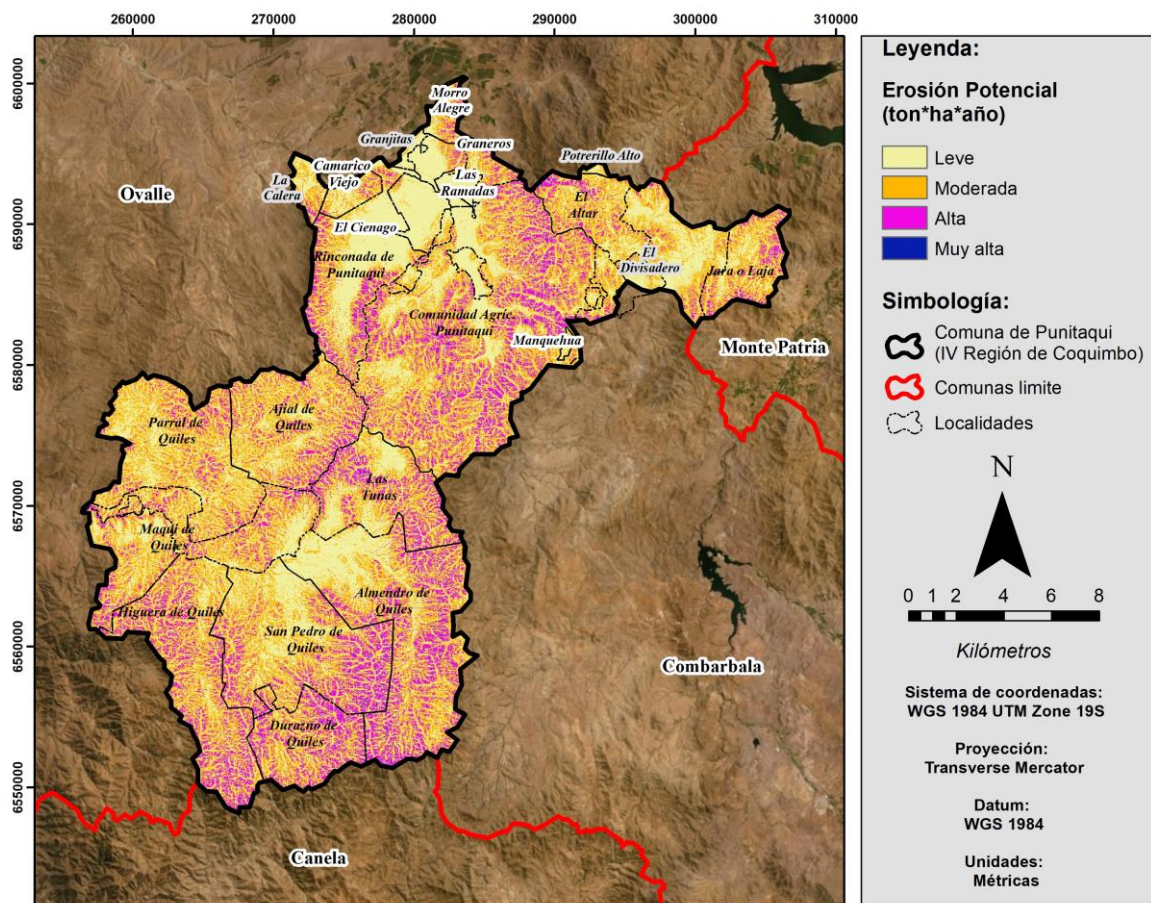
En cuanto a la erodabilidad de los suelos, como se destacó previamente, viene condicionada por las clases texturales presentes en la comuna, así como el porcentaje asociado de materia orgánica (que en este estudio está supuesto). Predominan en Punitaqui, los suelos del tipo Franco arcilloso arenoso y Franco arenoso. Según Stewart *et al* (1975) la mayor susceptibilidad a la erosión se presenta en texturas del primer tipo (que poseen una erodabilidad promedio de 0,24 ton\*h/MJ/cm). Aunque la clase textural de un suelo resulta un buen indicador de la erodabilidad, sobre todo porque guarda relación con la capacidad de infiltración del agua, como señala Morgan (1997) este proceso no es absoluto, en especial en zonas donde la actividad agrícola ha modificado los estratos de suelo ocasionando variaciones en las velocidades locales de infiltración lo que puede ser característico de zonas como Punitaqui cuyos territorios han destacado por la intensa actividad agropecuaria. La clasificación empleada, se basa en mediciones realizadas en suelos estadounidenses por más de 40 años, lo que añade otro elemento altamente variable en relación al estudio realizado puesto que son zonas geográficamente distintas.

Con todo, se puede establecer que independiente del tipo de textura, a medida que el factor topográfico se complejiza, la estabilidad de los agregados disminuye, por lo que la

erosión puede ser mayor en zonas donde coinciden texturas del tipo Franco arcilloso arenoso y altos valores del parámetro de topografía de aporte (LS).

La erosión hídrica potencial en tanto viene a reflejar las pérdidas de suelo por erosión laminar y de surcos que se producirían en caso de mantenerse en el tiempo las condiciones de los parámetros R, LS y K en ausencia de la capa protectora vegetal (Factor C). Si desapareciese este elemento del paisaje, la erosión promedio correspondería a 26,11 toneladas por hectárea anuales (**Figura 3.8**)

**Figura 3.8 Erosión Potencial en Punitaqui**



Fuente: Elaboración propia

En general se mantiene la misma distribución de la erosión en la comuna, aunque las pérdidas de suelo aumentan por categoría. Por ejemplo, disminuye la erosión leve (43,8%) pero aumentan la erosión moderada (38,6%) y alta (17,2%) (**Tabla 3.4 y Figura 3.9**):

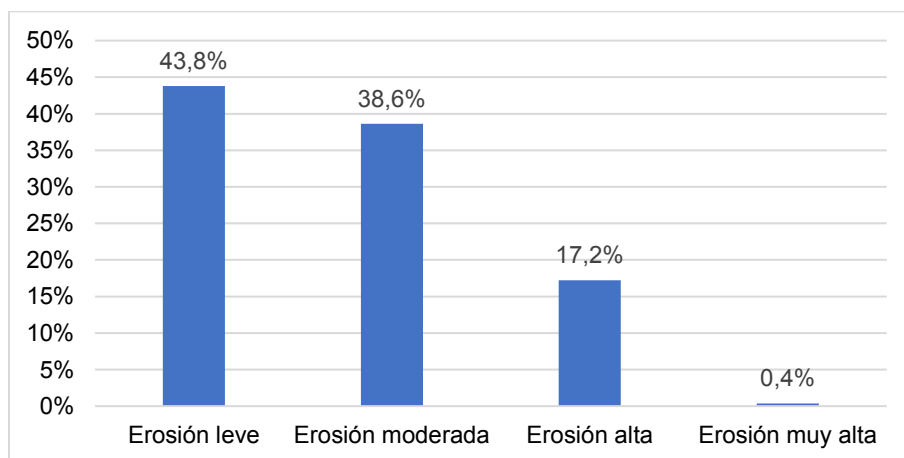


**Tabla 3.4 Superficie afectada Erosión Hídrica Potencial en Punitaqui**

Localidad	Superficie en Hectáreas					Erosión (%)
	Erosión leve	Erosión moderada	Erosión alta	Erosión muy alta	Total general	
Ajial de Quiles	2643,27	2992,40	936,58	9,43	6581,68	6,4%
Almendo de Quiles	5127,41	4158,45	2632,60	70,53	11988,98	11,6%
Camarico Viejo	443,21	308,66	64,83	0,09	816,78	0,8%
Comunidad Agríc Punitaqui	8880,11	9177,61	4573,61	120,27	22751,60	22,0%
Durazno de Quiles	1286,31	1614,53	1268,29	38,71	4207,85	4,1%
El Altar	3288,27	2666,01	533,44	6,81	6494,53	6,3%
El Cienago	1326,46	120,09	11,81	0,00	1458,37	1,4%
El Divisadero	642,54	580,68	115,61	1,56	1340,39	1,3%
Graneros	783,28	185,17	56,23	0,00	1024,69	1,0%
Granjitas	261,34	18,20	0,18	0,00	279,72	0,3%
Higuera de Quiles	2808,58	3456,41	1948,18	38,36	8251,53	8,0%
Jara o Laja	1082,20	1287,93	421,39	5,57	2797,08	2,7%
La Calera	400,19	310,38	54,40	0,63	765,60	0,7%
Las Ramadas	464,67	8,89	0,24	0,00	473,80	0,5%
Las Tunas	2375,56	1932,65	1123,76	24,94	5456,91	5,3%
Manquehua	75,48	47,01	1,99	0,00	124,48	0,1%
Maqui de Quiles	1424,69	1361,22	386,11	4,44	3176,46	3,1%
Morro Alegre	347,13	351,35	125,35	0,36	824,19	0,8%
Parral de Quiles	3468,76	3808,39	778,42	4,96	8060,53	7,8%
Potrillo Alto	66,08	42,19	1,82	0,00	110,09	0,1%
Rinconada de Punitaqui	3846,55	1805,71	822,44	14,78	6489,47	6,3%
San Pedro de Quiles	4140,28	3648,80	1891,79	52,16	9733,03	9,4%
<b>Total general</b>	<b>45182,35</b>	<b>39882,73</b>	<b>17749,09</b>	<b>393,59</b>	<b>103207,76</b>	<b>100%</b>

Fuente: Elaboración propia

**Figura 3.9 Porcentajes de erosión hídrica actual en Punitaqui, por categorías**



Fuente: Elaboración propia

Estos resultados pueden analizarse también desde la óptica conservacionista, donde entra el concepto de pérdida tolerable de suelo, que se define como la tasa máxima de erosión permisible para que la fertilidad del suelo pueda mantenerse durante 20 o 25 años.

Se han propuesto bastantes valores de pérdidas tolerables de suelo, los que generalmente se establecen según las condiciones de los distintos terrenos. En suelos de textura media a moderadamente gruesa y con buenas prácticas de cultivo, las tasas anuales de formación de la superficie de suelo pueden alcanzar las 11,2 toneladas/anuales (Bennet, 1939; Hall *et al*, 1979 citados por Morgan, 1997), por otro lado en condiciones particularmente sensibles como ocurre en el caso de suelos de baja profundidad y altamente erosionables, se recomiendan valores tan bajos como 2 toneladas/anuales.

Kyrby (1980) sitúa las pérdidas tolerables en un rango de 0 a 24,71 toneladas/hectárea/anuales lo que se conmuta con pérdidas entre 0.2-1 mm/ anuales desde la superficie de suelo. En base a esto último se puede realizar una categorización de la erosión hídrica actual en Punitaqui con presencia de vegetación haciendo una diferenciación entre pérdidas tolerables v/s no tolerables (**Figuras 3.10, Figura 3.11**):

**Figura 3.10 Pérdidas de suelo bajo óptica de conservación (con vegetación)**

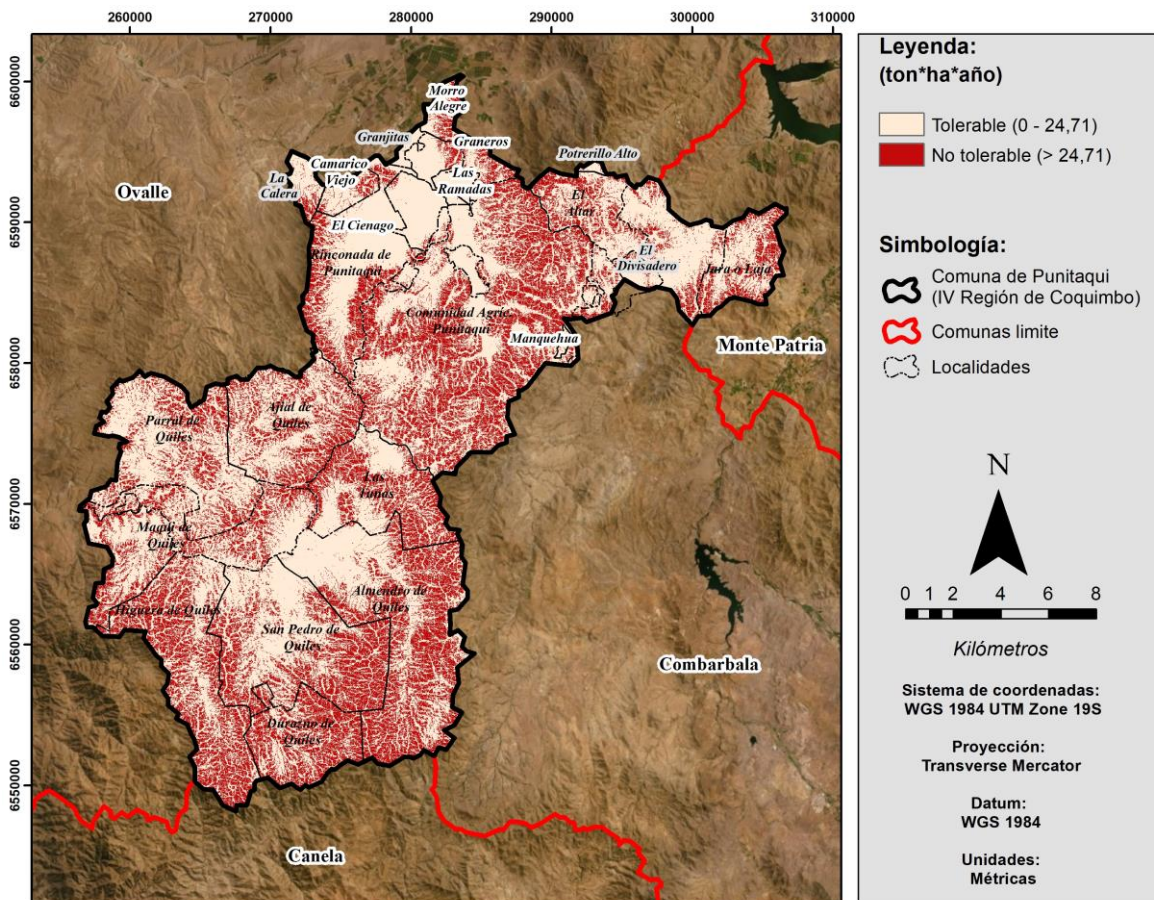


Figura: Elaboración propia

**Figura 3.11 Porcentajes de pérdidas según óptica de conservación (con vegetación)**

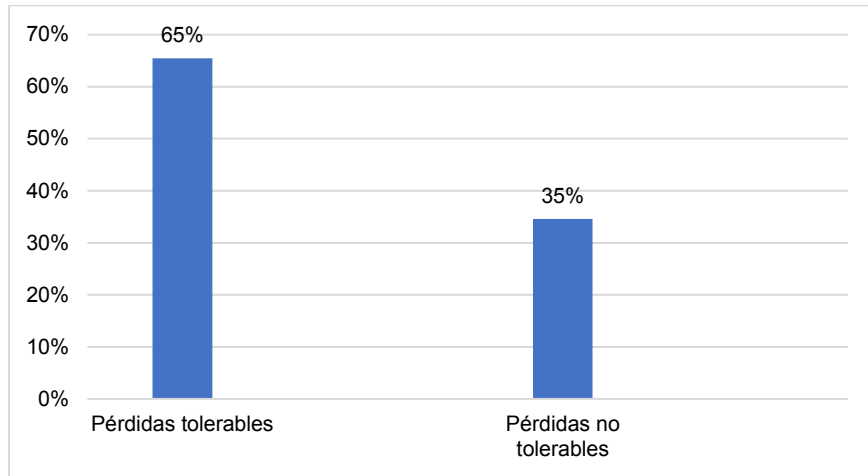


Figura: Elaboración propia

La distribución de las pérdidas tolerables alcanza el 65% de la superficie de la comuna (alrededor de 70.971 hectáreas) mientras que la categoría de pérdidas no tolerables cubre el 35 % (37.482 hectáreas). En general, la erosión en un suelo se considera aceptable cuando esta sincronizada con la tasa de meteorización química que permite la regeneración del recurso (Kirby, 1980), aunque como señala Morgan (1997) esta clase de recomendaciones sobre pérdidas tolerables de suelo están basadas exclusivamente en consideraciones de tipo agrícolas.

A partir de los estudios sobre los mecanismos de desprendimiento y transporte de las partículas de suelo por salpicadura, escorrentía y viento, se deduce que las estrategias de conservación del suelo deben basarse en promover el desarrollo de la cobertura vegetal como medio para proteger la superficie del impacto de las gotas de agua en el suelo. También se puede destacar su rol en el aumento de la capacidad de infiltración para reducir la escorrentía; en la mejora de la estabilidad de los agregados del suelo; y en el incremento de la rugosidad superficial para reducir la velocidad de la escorrentía superficial o el viento (Morgan, 1997).

Refiriéndose brevemente a la validez del modelo empleado, desgraciadamente como no se conoce el detalle de las distintas tasas de erosión por etapas de desarrollo de los cultivos, como por ejemplo en la zona norte de la comuna, el resultado final de pérdidas de suelo en los fondos de valle queda al debe en comparación al que refleja el modelo en las áreas montañosas o de cerros. De todas maneras, en gran parte de las comunas ubicadas en la unidad de media montaña, el desarrollo de cultivos es una práctica común en tierras marginales con alta inclinación.

Finalmente, y a nivel potencial, si no se considera el factor C de cobertura vegetal, el porcentaje pérdidas tolerables de suelo disminuye (**Figura 3.12, Figura 3.13**):

**Figura 3.12 Pérdidas de suelo bajo óptica de conservación (sin vegetación)**

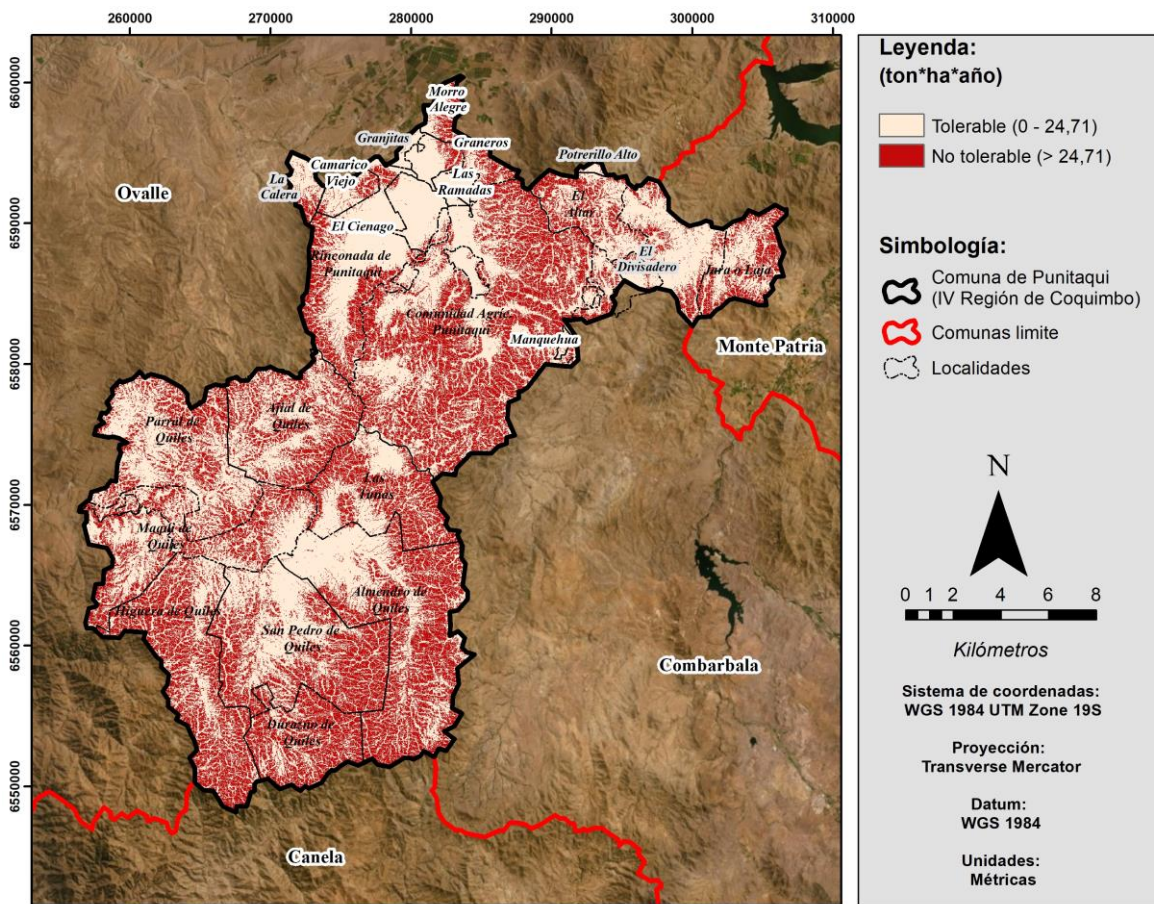


Figura: Elaboración propia

**Figura 3.13 Porcentajes de pérdidas de suelo según óptica de conservación (sin vegetación)**

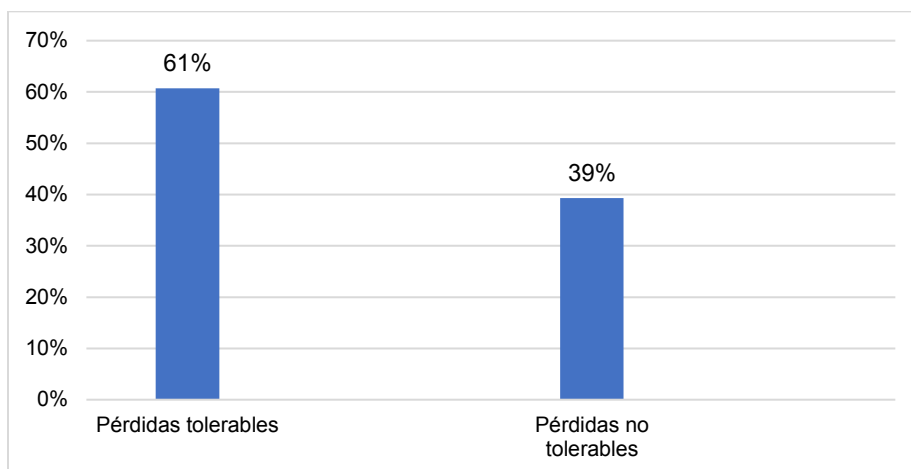


Figura: Elaboración propia

Con este último resultado se maneja que las pérdidas tolerables abarcan un 61% de la superficie (alrededor de 65.815 hectáreas) aumentando las pérdidas no aceptables a un 39% (42.641 hectáreas).

## 4. Discusiones

El modelo USLE fue diseñado originalmente como una herramienta para planificar la conservación de suelos, pero debido a su sencillez se han hecho intentos de utilizarla como técnica de investigación en áreas donde las condiciones del paisaje difieren a las de los territorios donde el modelo fue calibrado originalmente, en esencia suelos estadounidenses. Como describe Morgan (1997) aunque la ecuación es llamada universal, su base de datos (que representa más de 10.000 años de registro) está limitada al este de las montañas rocosas de EE. UU. y para pendientes de cultivo entre 0 y 7 ° con suelos de bajo contenido en montmorillonita. Las pocas recopilaciones serias de datos que permiten ocupar la ecuación en otros países han sido desarrolladas en zonas como África Occidental, India así como en Baviera. (Morgan, 1997).

El modelo asume que los cinco componentes (erosividad de las precipitaciones, erodabilidad del suelo, topografía, cobertura vegetal y prácticas de manejo) son suficientes para obtener las pérdidas de suelo por efectos de la erosión hídrica de tipo laminar y de surcos, pero los vínculos entre los factores no están suficientemente elaborados, y existen ciertas inconsistencias que conviene evaluar. En este capítulo por tanto se realiza una revisión crítica de los elementos que intervienen en el cálculo de cada uno de los factores en su versión original, así como de los procesos alternativos que fue necesario emplear para estimar los factores en este estudio.

Partiendo por el factor R, que refleja la influencia de las precipitaciones en la erosión en base a la sumatoria de las intensidades de los eventos en 30 minutos, es sabido que su cálculo se basa en el método  $EI_{30}$  (intensidad de la precipitación en 30 minutos), del cual Morgan (1997) señala que contiene algunas imprecisiones. Por ejemplo, no se puede garantizar su validez para lluvias tropicales de alta intensidad y para grandes altitudes; en segundo lugar, sobreestima la importancia de las lluvias de baja intensidad; y por último, se puede mencionar que no existe una razón fundada para elegir como parámetro la máxima intensidad de la lluvia en 30 minutos. Pero la principal falencia de este índice radica en su poca aplicabilidad en gran parte de los países debido a la ausencia de datos de intensidades de eventos de tormenta en la mayoría de las estaciones pluviométricas, lo que obliga (como en el caso de este estudio) a obtener el factor de erosividad de las precipitaciones en base a índices de agresividad climática como el Índice Modificado de Fournier o MFI (Arnoldus, 1980) que deriva del Índice de Fournier o IF (1960). Este último es estrictamente un índice de concentración de la precipitación en un solo mes, y brinda una medida burda de la intensidad, de modo que un valor alto significa un régimen fuertemente estacional con una estación seca en la que la cobertura vegetal decae y por lo tanto la erosión disminuye. La única diferencia entre los dos índices es que en el MFI se calcula la agresividad de las precipitaciones en todos los meses, lo que lo hace más representativo del proceso, aunque sigue siendo una aproximación débil de la intensidad de las lluvias en caso de ser utilizado.

En este estudio, la erosividad de las precipitaciones fue obtenida mediante una fórmula de Valenzuela & Morales (2004) ajustada para la región de Coquimbo (**Capítulo 2, sección 2.3.1.**). Puntualmente, estos autores seleccionaron por analogía climática una ecuación de R desarrollada en España por el Instituto para la Conservación de la Naturaleza (ICONA) (1988) y que emplea el MFI. Los resultados clasificados en base a Páez (1999), prueban ser bastante bajos, concentrándose la mayor erosividad de las precipitaciones en las localidades al sur de Punitaqui. Si bien la zona se destaca por poseer un clima semiárido con lluvia invernal, la desprotección de los suelos por la escasa presencia de vegetación en la comuna puede propiciar un escenario de mayor erosión en súbitos eventos de tormenta, que como se sabe, son posibles de ocurrir en zonas semiáridas donde las lluvias van disminuyendo interanualmente, pero van expresándose en eventos cada vez más violentos.

Respecto a la erodabilidad de los suelos, que en USLE está incluida en el factor K, la mayoría de los casos se establece mediante el nomograma o bien, en territorio estadounidense existen tabulaciones de este factor que permiten determinarlo con el conocimiento previo de ciertas características de los suelos. En este estudio los valores de K se obtuvieron de la clasificación de Stewart *et al* (1975) que establece la erodabilidad de un suelo en función de su textura y el porcentaje de materia orgánica asociado al mismo (**Capítulo 2, sección 2.3.2.**). Como se ha explicado con anterioridad, estas características son importantes en relación a la erodabilidad, siendo la textura un buen indicador de la capacidad de infiltración de un suelo y la materia orgánica un buen indicador de la estabilidad de los agregados. Morgan (1997) señala que el comportamiento de la infiltración es bastante complejo en muchos suelos cuyo perfil está constituido por dos o más estratos con diferentes conductividades hidráulicas. La mayor parte de los suelos agrícolas, tienen un estrato superficial alterado por el laboreo y subsuelo no alterado, lo que en definitiva ocasiona variaciones locales considerables en las velocidades de infiltración debido a diferencias en la estructura, compactación del suelo y densidad de vegetación. Con respecto al contenido de materia orgánica, autores como Voroney *et al* (1981) citado por Morgan (1997) sugieren que la erodabilidad del suelo disminuye conforme se incrementa la presencia de materia orgánica en un rango de 0-10%. La mayoría de los suelos contienen menos del 15% de materia orgánica y los suelos con texturas de tipo arenoso contienen menos del 2% (Morgan, 1997). Al igual que como sucede con propiedades del suelo como la textura, este tipo de relaciones no son absolutas, puesto que existen suelos con alto contenido de materia orgánica que son propensos a la erosión ya sea por agua o viento, mientras que suelos con muy bajo contenido orgánico pueden ser bastante resistentes en condiciones de sequedad. Con esto, se tiene que el rol desempeñado por la materia orgánica depende de las condiciones de origen (Morgan, 1997). En este estudio se contó con el detalle de clase textural pero no con los datos porcentajes de materia orgánica por lo que al igual que el factor R, el parámetro de erodabilidad de Punitaqui se puede considerar un resultado meramente de aproximación.

En cuanto al factor topográfico LS, como señala Giménez (2008) es uno de los que genera más inconvenientes en su cálculo debido a su concepto original basado en parcelas de experimentación, con terrenos uniformes tanto en pendiente como en longitud superficial.

Aun así, dentro del modelo original es el que más implícitamente considera la escorrentía, ya que como se ha explicado, las variables de longitud y gradiente de pendiente al aumentar inciden en la velocidad de los flujos (que al aumentar ganan en capacidad de desprendimiento). Oliveira *et al* (2013) señala que uno de los errores de los modelos empíricos radica en el hecho de que la erosión hídrica, siendo un proceso hidrológico, no es evaluada en relación a la escorrentía. Este tipo de inconvenientes limitan su potencial para predecir los cambios en los factores de la erosión en escalas espaciales como la de una cuenca o red de drenaje. En base a esto, para evaluar el efecto de los flujos de drenaje en relación al paisaje y su efecto erosivo, se optó por el modelo de tipo conceptual USPED que se relaciona con lo que Giménez (2008) denomina como topografía de aporte, donde el parámetro clave es la distribución de flujos sobre el área de aporte (**Capítulo 2, sección 2.3.3.**). Como se explicó previamente, en este tipo de modelos el factor LS original de USLE se reemplaza por lo que se conoce como área de contribución, que es el área total de captación por encima de una corta longitud de curva de nivel (Giménez, 2008). Mediante un modelo digital de elevación es posible obtener tanto la dirección como acumulación de flujo, que son variables necesarias para obtener el área de contribución. El resultado final ilustra tanto las zonas de erosión como de sedimentación mediante valores altos y bajos respectivamente. Se puede inferir que la mayor acción de los distintos flujos superficiales en la erosión laminar y de surcos coincide durante el intervalo de meses de julio-septiembre, época donde ocurren los mayores caudales. En general los mayores valores por erosión hídrica se concentraron en las zonas de quebradas de la comuna.

Sobre el factor C de cobertura vegetal o de manejo de cultivo, Mancilla (2008) destaca que representa los efectos de porcentaje de cubrimiento de la vegetación, el efecto protector de los residuos vegetales incluidos en la hojarasca y la acción de agregación que tienen las raíces en el suelo. Para su determinación en cultivos agrícolas se requiere el detalle de todas las labores de rotación durante el año y sus equivalentes de erosividad por periodo de rotación. Los valores individuales de cada cultivo por periodo están sintetizados en tablas elaboradas por el *United States Soil Conservation Service* y se ponderan de acuerdo a la lluvia media anual del mismo periodo, lo que resulta en el valor final del parámetro. Este método no se recomienda para zonas distintas a EE. UU. y se puede señalar que las tabulaciones para terrenos agrícolas pueden considerarse más precisas, pero para sitios forestales estas denotan un sesgo importante, que obliga a efectuar muchos supuestos (Mancilla, 2008; Morgan, 1997).

Dada estas consideraciones el factor C de esta investigación ilustra zonas dentro de la comuna que tienden a la vegetación v/s las que se asemejan a suelo desnudo, todo esto en base al análisis de regresión de un NDVI. Como se sabe, en este índice se definen zonas con o sin vigor vegetacional dependiendo de si los valores se sitúan entre -1 o 1 respectivamente.

En contrapartida los valores para el factor C se sitúan entre 0 y 1, denotando cubierta vegetacional y suelo desnudo correspondientemente. En base a un estudio de Pathil & Sharma (2013) se asumió una correlación lineal entre los valores de un NDVI y los del factor



C, por lo que utilizo una ecuación de regresión que deja los valores del índice de vegetación en un rango que corresponde a los valores típicos del factor C (**Capítulo 2, sección 2.3.4.**). El parámetro refleja la distribución de la cobertura vegetal en la comuna aunque sin la información sobre manejo en cultivos o las tasas de erosión que se producen en ellos en diferentes etapas del año. En base a esto, el modelo final queda al debe en cuanto a reflejar la erosión que ocurre en los fondos de valle, aunque en general el fenómeno alcanza sus mayores picos cuando se ocasionan lluvias intensas en un contexto donde los suelos poseen baja cobertura vegetal, lo que es común en ambientes áridos, semiáridos y mediterráneos (Kirby, 1980).

En definitiva, el resultado del modelo USLE aplicado en Punitaqui contiene algunas falencias importantes que se deben a la ausencia de datos clave que provocaron que el cálculo de los parámetros hiciera varias suposiciones, especialmente en relación a la erosividad (R) y erodabilidad (K). El resultado final ilustra que la erosión hídrica que se distribuye en relación a los valores del factor LS y C. Como destaca Oliveira et al (2013) los valores más altos del modelo de topografía de aporte reflejan variaciones mayores en la capacidad de transporte del flujo en el paisaje por lo que se puede asumir una mayor capacidad de desprendimiento de partículas. Este hecho en combinación con zonas que no cuentan con protección vegetal o asemejan a suelo desnudo pueden conducir a una mayor erosión.

Las pérdidas de suelo arrojadas por erosión hídrica actual y potencial correspondieron respectivamente a 22,40 y 26,11 ton/hect/año, por lo que según la clasificación empleada de FAO (1980) el grado de erosión es moderado, adjetivo que probablemente no corresponde con las condiciones de la comuna, cuyos suelos han estado sometidos durante siglos a la sobreexplotación agrícola y también al pastoreo (especialmente en las localidades ubicadas al norte) y. El peor resultado de esto corresponde a la pérdida de la vegetación nativa tanto en cantidad como en distribución (Jorquera, 2001).

Como se ha descrito previamente las pérdidas aceptables de suelo señaladas por Hudson (1980) citado por Morgan (1997), en condiciones especialmente sensibles se ubican en un tramo entre 11 a 20 ton/ha/año. Kirby (1980) en tanto, entrega que las pérdidas de suelo adecuadas se ubican en un rango de 0 - 24,71 toneladas de hectáreas anuales lo que se conmuta con pérdidas entre 0.2 - 1 mm/ año desde la superficie de suelo por lo que si la comuna perdiera la totalidad de su cobertura vegetal, la tasa de erosión a nivel potencial no mantiene el ritmo con la tasa de meteorización química que forma nuevo suelo (Kirby, 1980).

## 5. Conclusiones

La Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo (USLE) tiene una empleabilidad limitada en países como Chile debido a la ausencia de registros históricos que en caso de contarse permitirían desarrollar los factores de la ecuación paramétrica empleando los métodos originales de cálculo. Se puede mencionar igualmente que el modelo asume quizá de forma errada que se puede obtener las pérdidas de suelo por erosión hídrica (laminar y de surcos) contando solo con 5 parámetros, que son los consabidos de erosividad de las precipitaciones (R), erodabilidad del suelo (K), topografía (LS), manejo de cultivos (C) y prácticas de control de erosión (P). Aun considerando las imperfecciones teóricas del modelo original, así como la escasez de datos, se obtuvo una estimación de las pérdidas de suelo en toneladas por hectárea anuales en la comuna de Punitaqui durante un periodo de 17 años, optando por métodos alternativos y que han sido recogidos de variadas investigaciones científicas que han empleado el USLE.

Como se describió previamente, fue necesario sustituir algunas de las variables clave que inciden en el cálculo de factores como R, K, LS y C. En el caso del primer factor, que refleja la influencia de la erosividad de las precipitaciones, hubo que reemplazar la variable de intensidad de precipitaciones por el Índice Modificado de Fournier que refleja la agresividad climática de un área considerando las precipitaciones mensuales. Este índice fue insumo en la ecuación de Valenzuela & Morales (2004), configurada para predecir la erosividad de las precipitaciones en la Región de Coquimbo. En base a las clasificaciones usadas para establecer la gravedad del fenómeno pluviométrico, se obtuvo que en las localidades del sur de la comuna es donde el clima se ha comportado más agresivamente, aunque para toda la zona, la mayoría de los valores tanto de MFI como de R se ubican entre bajo y muy bajo, lo que se corresponde con el clima semiárido de lluvia invernal en que se ubica la comuna.

El factor de erodabilidad fue obtenido en base a la clasificación de Stewart *et al* (1975) en la que están tabulados los valores de K para cada clase textural con cierto porcentaje de materia orgánica asociado. Los suelos de la comuna transitan mayormente entre texturas de tipo Franco arcilloso arenoso y Franco arenoso con predominio de los primeros, que de paso son ligeramente más erodables. El resultado de este parámetro se basa en que tanto la capacidad de infiltración (que viene determinada por la textura) así como el contenido de materia orgánica (que fue supuesto en este estudio) son buenos indicadores de la erodabilidad de un determinado suelo, aunque como se ha destacado previamente, estas características son altamente relativas dependiendo de la zona de estudio, sobre todo en zonas de cultivo, donde existen variaciones en las velocidades de infiltración.

Con respecto al elemento topográfico LS, se estableció en el modelo una simulación de la topografía de aporte, que ilustra la distribución de los flujos en relación a la convergencia y divergencia de laderas. Los valores bajos y altos reflejan tasas de deposición y erosión respectivamente y lo hacen en función de las variaciones en las capacidades de transporte de los flujos. Aun así, es difícil evaluar el rol de flujos superficiales en la erosión de Punitaqui. Como se sabe la mayoría de sus cauces son del tipo esporádico puesto que no

cuentan con recursos hídricos suficientes como para escurrir permanentemente, además, no reciben aportes nivales. Como se ha mencionado reiteradas veces, los mayores caudales del Estero Punitaqui ocurren durante la estación invernal, concretamente entre los meses de julio y septiembre por lo que se desprende que es en aquella época del año donde generalmente se genera la mayor erosión por flujo superficial, especialmente en las áreas de quebradas.

Es sabido que en la comuna se ha desarrollado una intensa actividad agropecuaria de la mano de la agricultura y el pastoreo, que son los dos grandes responsables de la modificación de las condiciones originales del sustrato suelo en la comuna, siendo el mayor impacto, la disminución de la cobertura vegetal nativa, hecho que se ve reflejado en el factor C. Aunque originalmente este parámetro describe la erosión que se presenta según tipo de cultivo en base a las etapas de desarrollo de este, en este trabajo el factor distingue entre zonas que presentan cierta cobertura vegetal v/s las que tienden a suelo desnudo. Por defecto, este parámetro representa los cultivos ubicados al norte como zonas vegetadas, no incluyendo las tasas de erosión por etapa de desarrollo que conllevan.

Como destaca Kirby (1980) en zonas semiáridas es difícil separar la erosión por efecto de acciones antrópicas respecto la que se da por condiciones naturales, aunque a la vez menciona que en este tipo de ambientes los cambios climáticos más pequeños pueden incidir de forma fundamental en la erosión. Como es sabido la mayor erosión hídrica ocurre con precipitaciones medias anuales de 300 mm, que como señala Morgan (1997) son suficientes para generar una cantidad de escorrentía reconocida bajo determinadas condiciones de temperatura. En el caso de Punitaqui, a nivel anual la precipitación en 17 años nunca excedió los 30 mm promedio. Esto no representa en ningún caso una medida de la intensidad.

Si se considera el modelo como válido, este arroja pérdidas actuales y potenciales de suelo de 22,40 y 26,11 toneladas por hectárea anuales, respectivamente. Bajo la óptica de la conservación de suelos, se ha estimado que una erosión aceptable se ubica en un rango de 0 - 24,71 toneladas de hectáreas anuales, lo que significa pérdidas entre 0.2-1 mm/ anuales desde la superficie de suelo por lo que si la comuna pierde la cobertura vegetal existente, la tasa de erosión no estaría sincronizada con el ritmo de la tasa de meteorización química que forma nuevo suelo. (Kirby, 1980).

En cuentas resumidas, cualquier modelo consiste en una simplificación necesaria de la realidad, donde, de los objetivos buscados depende el nivel de complejidad o sencillez de las decisiones que se deban tomar, por lo tanto, el punto de partida de toda modelización es el establecimiento claro de los objetivos que pueden ser de explicación o de predicción (Morgan, 1997). En esta investigación se buscó determinar las tasas de erosión actuales y potenciales teniendo en cuenta que los datos para la obtención de los parámetros que componen el modelo USLE, eran limitados. Esto significó realizar ciertas suposiciones o remplazos que dotan de inexacto el resultado final. Con todo, se puede dar cuenta que las herramientas de los sistemas de información geográfica permiten obtener algunos elementos de la ecuación de forma más expedita que en el pasado por lo que se puede elaborar una estimación conceptual rápida de la erosión que al menos debiera representar

un insumo para trabajos posteriores que cuenten con mayores recursos y tiempo; y que logren en definitiva dar cuenta del estado de los suelos en una zona con condiciones climáticas del semiárido.

## Bibliografía

ABATZOGLOU, J. T., DOBROWSKI, S. Z., PARKS, S. A., & HEGEWISCH, K. C. (2018). TerraClimate, a high-resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958–2015. *Scientific data*, 5, 170191.

ALATORRE, L., & BEGUERÍA, S. (2009). Los Modelos de Erosión: Una revisión. *Revista C&G*, 29-48.

ARAYA-VERGARA, J. F., & BÖRGEL, R. (1972). *Definición de parámetros para establecer un banco nacional de riesgos y amenazas naturales. Criterios para su diseño*. ONEMI/ PNUD/ U CHILE.

ARNOLDUS, H. M. (1980). An Approximation of the Rainfall Factor in the Universal Soil Loss Equation. En M. De Boodt, & D. Gabriels, *Assessment of Erosion* (págs. 127-132). New York: John Wiley and Sons Ltd.

ASTUDILLO, F. I. (2011). *Controles detemrinantes en la Geoquímica y Mineralogía de los sedimentos fluviales activos en la cuenca del Río Limarí - IV Región de Coquimbo, Chile*. Santiago de Chile.

BASCUÑAN, S. M. (2010). *Relación entre la erosión producida por un flujo superficial en suelos finos y algunas propiedades de estos*. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Civil, Santiago de Chile.

BIENES, R. (2006). *La erosión hídrica: importancia y clases. Parametros climaticos condicionantes de la erosión (intensidad, torrencialidad, aridez, deficit hídrico, tamaño gota)*. Departamento de Geología de la Universidad de Alcalá.

BUBENZER, G. D., & KENT MITCHELL, J. (1980). Soil loss estimation. En M. J. Kirby, & R. Morgan, *Soil Erosion* (págs. 17-62). John and Sons.

CASTRO, R. (2016). *Evaluación de Impactos de riesgos de activación de procesos erosivos*. Servicio Agrícola y Ganadero, División de Protección de los Recursos Naturales Renovables.

CHUVIECO, E. (2010). *Teledetección Ambiental: La observación de la Tierra desde el espacio*. España: Ariel.

CISNEROS, J. M., CHOLAKY, C. G., GUTIERREZ, A., GONZALEZ, J. G., REYNERO, M. A., DIEZ, A., & BERGESIO, L. (2012). El Proceso de la erosión hídrica. En *Erosión Hídrica: principios y técnicas de manejo* (págs. 61-102).

CORPORACIÓN NACIONAL FORESTAL (CONAF). (2016). *Catastro de uso de suelo y vegetación*. Santiago. Recuperado el 8 de Septiembre de 2019, de [http://www.ide.cl/descargas/capas/conaf/Catastro\\_uso\\_suelo\\_y\\_vegetacion.rar](http://www.ide.cl/descargas/capas/conaf/Catastro_uso_suelo_y_vegetacion.rar)

DELGADO, S. (2001). El mercado de acciones de aguas en el valle de punitaqui: efectos sociales y espaciales. *Notas Históricas y Geográficas*, 255-268.

EVANS, R. (1980). Mechanics of water erosion and their spatial and temporal controls: an empirical viewpoint. En M. J. Kirby, & R. P. Morgan, *Soil Erosion* (págs. 109-128). John Wiley and Sons Ltd.

FAO (1980). *Metodología provisional para la evaluación de la degradación de los suelos*.

FELICÍSIMO, Á. M. (1994). *Modelos digitales del terreno. Introducción y aplicaciones en las ciencias ambientales*.

FERRANDO, F. J. (2002). Cuenca del Río Limarí, Chile Semiárido: Aspectos de la Oferta y Demanda de Agua. *Revista de Geografía Norte Grande*(30), 23-44.

FLORES, J. P., Espinoza, M., Martínez, E., Henríquez, G., Avendaño, P., Torres, P., & Ahumada, I. (2010). *Determinación de la erosión actual de los suelos de Chile*. Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN), Santiago de Chile.

FLORES, J. P., Lopez, M. C., & Salazar, J. R. (2013). *Estado Actual de los suelos de la Región de Coquimbo, Propuesta de Implementación, Capacitación y Actualización de Sistemas de Información Territorial Comunal para la toma de decisiones (SIG) en la Región de Coquimbo*. Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN), Santiago de Chile.

FOURNIER, F. (1960). *Climat et erosion : la relation entre l'erosion du sol par l'eau et les precipitations atmospheriques*. Paris: Presses Universitaires de France.

GAJARDO, R. (1994). *La Vegetación Natural de Chile, clasificación y distribución geográfica*. Editorial Universitaria.

GELER, T., CRÓSTA, A., & PEREZ, A. (s.f.). *Análisis del Factor en diferentes modelos de predicción de la erosión hídrica del suelo*.

GIMÉNEZ, M. (2008). *Metodología de calculo del factor topografico, LS, integrado en los modelos RUSLE y USPED, Aplicación al arroyo del lugar, Guadalajara (españa)*.

GONZAGA, C. (2014). *Aplicación de índices de Vegetación Derivados de Imágenes Satelitales Landsat 7 ETM+ y ASTER para la Caracterización de la Cobertura Vegetal en la Zona Centro de la Provincia De Loja, Ecuador*. Tesis de Maestría, Universidad Nacional de La Plata, Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, La Plata.

GRAUSO, S., VERRUBBI, V., PELOSO, A., SCIORTINO, M., & ZINI, A. (2018). *Estimating The C factor of USLE/RUSLE By Means of NDVI Time-Series In Southern Latium, An Improved correlation model*. Italian Agency for New Technologies, Energy and Sustainable Economic Developments.

HENG, T., de JESUS, J. M., MCMILLAN, R. A., BATJES, N. H., HEUVELIK, G. B., RIBEIRO, E. & Gonzalez, M. R. (2014). SoilGrids1km—global soil information based on automated mapping. *PLoS one*, 9(8), e105992.

HOFFMANN OLIVEIRA, A., SILVA, M. A., NAVEZ SILVA, M. L., CURI, N., KLINKE NETO, G., & de FREITAS, D. A. (2013). Development of Topographic Factor Modeling for Application in Soil Erosion Models. En M. C. Hernandez Soriano, *Soil Processes and Current Trends in Quality Assessment* (págs. 111-138).

HUERTA, G. (2009). *Hidrogeoquímica de Aguas Subterráneas en la Cuenca del Estero Punitaqui, IV Región*. Memoria para optar al título de Geólogo, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Geología, Santiago de Chile.

IBAÑEZ, J., MACHADO, C., ZUCARELLO, V., & GONZALEZ, C. (1995). *Modelos de simulación y variabilidad espacio-temporal*.

INFRAESTRUCTURA Y ECOLOGÍA S.A. (2015). *Fortalecimiento de la gestión privada de los recursos hídricos y sus afluentes, Región de Coquimbo*. Ministerio de Agricultura, Instituto de Desarrollo Agropecuario.

INSTITUTO NACIONAL DE RECURSOS NATURALES. (1979). *Fragilidad de los ecosistemas naturales de Chile*.

JORQUERA, C. (2001). Evolución Agropecuaria de la Región de Coquimbo: Análisis Contextual para la Conservación de la Vegetación Nativa. En F. A. Squeo, G. Arancio, & J. R. Gutiérrez, *Libro Rojo de la Flora Nativa y de los Sitios Prioritarios para su Conservación: Región de Coquimbo* (págs. 225-237). Ediciones Universidad de La Serena.

JORQUERA, C. (2001). La Agricultura Regional y el deterioro de la vegetación nativa: Una Visión Actualizada. En F. A. Squeo, G. Arancio, & J. R. Gutiérrez, *Libro Rojo de la Flora Nativa y de los sitios Prioritarios para su Conservación: Región de Coquimbo* (págs. 239-251). Chile: Ediciones Universidad de La Serena.

KARABURUN, A. (2010). Estimation of C factor for soil erosion modeling using NDVI in Buyukcekmece. *Ozean Journal of Applied Sciences*, 3(1), 77-85.

KIM, Y. (2014). *Soil Erosion using GIS and Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)*.

KIRBY, M. J. (1980). The problem. En M. J. Kirby, & R. P. Morgan, *Soil Erosion* (págs. 1-16). John Wiley and Sons Ltd.



LEÓN, J. (2001). *Estudio y control de la erosión hídrica*. Medellín.

MANCILLA, G. (2008). *Uso y conservación de suelos: "Uso de la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo (USLE) en el campo forestal"*.

MEDINA, A. (2006). *Aternativas de Desarrollo Rural Sustentable para una Comunidad Agrícola Tradicional en proceso de Desertificación: El Divisadero, Comuna de Punitaqui, IV Región de Coquimbo*. Santiago.

MICHIELS, P., & GABRIELS, D. (1996). Rain variability indices for the assessment of rainfall erosivity in the Mediterranean environments. En J. L. Rubio, & A. Calvo, *Soil degradation and desertification in* . España: Geofoma Ediciones.

MITASOVA, H., HOFIERKA, J., ZLOCHA, M., & IVERSON, L. R. (1996). Modeling topographic potential for erosion and deposition using GIS. *International Journal of Geographical Information Systems*, 10(5), 629-641.

MORGAN, R. P. C. (1997). *Erosion y Conservación del Suelo*. Mundi Prensa.

MUNICIPALIDAD DE PUNITAQUI. (2018). *Actualización Plan desarrollo comunal (PLADECO) 2018-2023*. Punitaqui.

NOVOA, J. E., & LOPEZ, D. (2001). IV Región: El Escenario Geográfico Físico. En F. A. Squeo, G. Arancio, & J. R. Gutiérrez, *Libro Rojo de la Flora Nativa y de los Sitios Prioritarios para su Conservación: Región de Coquimbo* (págs. 13-28). Chile: Ediciones Universidad de La Serena.

PÁEZ, M. (1999). *Diseño de prácticas de conservación con la ecuación universal de pérdida de suelo*. CIDIAT.

PATIL, R. J., & SHARMA, S. K. (2013). *Remote sensing and GIS based modeling of crop/cover management factor (C) of USLE in Shakker river watershed*.

PINO, S. (2008). *Estimación de Perdidas de Suelo en Tres Situaciones de Manejo de Residuos Post-Cosecha, usando el Modelo Rusle, en el predio Pantanillos, VII región.*

PIZARRO, R., MORALES, C., VEGA, L., OLIVARES, C., VALDÉS, R., & BALOCCHI, F. (2009). *Propuesta de un modelo de estimación de erosión hídrica para la región de Coquimbo, Chile.*

PIZARRO, R., MORALES, C., VEGA, L., VALDÉS, R., OLIVARES, C., & BALOCCHI, F. (Septiembre de 2010). Evaluación de la Erosión Hídrica superficial en zonas áridas y semiáridas de Chile Central. *Aqua-LAC*, 2(2), 1-11.

ROUSE, J. W., HAAS, R. H., SCHELL, J. A., & DEERING, D. W. (1974). Monitoring vegetation systems in the great Plains with ERTS. En E. P. Marcanti, S. C. Fraden, & M. A. Becker, *Third ERST-1 SYMPOSIUM* (págs. 10-14).

SARRICOLEA, P., HERRERA-OSSANDON, M. J., & MESEGUER-RUIZ, Ó. (2017). Climatic Regionalization of continental Chile. *Journal of Maps*, 66-73. doi:10.1080/17445647.2016.1259592

SMITH, D.D. & WISCHMEIER, W.H. (1957). Factor affecting sheet and rill erosion. *Trans. Am. Geophys. Union*, 38, 889-896

SOIL SCIENCE DIVISION STAFF. (2017). *Soil survey manual, USDA handbook 18.* (C. DITZLER, K. SCHEFFE, & H. C. MONGER, Edits.) Washington, D.C., EE.UU.

STEWART, B. A., WOOLHISER, D. A., WISCHMEIER, W. H., CARO, J. H., & FRERE, M. H. (1975). *Control of Water Pollution from Cropland. Volume I, A manual for guideline development.* Agricultural Research Service, United States Department of Agriculture, Washington D.C.

UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL NORTE. (2007). *Evolución del Desarrollo Productivo de la Región de Coquimbo.* Universidad Católica del Norte, Escuela de Ingeniería Comercial, Instituto de Economía Aplicada Regional.

VALDEZ , E. (2014). *Análisis de Pérdida de suelos por erosión hídrica en la subcuenca Conduriri mediante la metodología RUSLE*. Universidad Nacional del Altiplano, Facultad de ingeniería agrícola.

VALENZUELA, B., & MORALES, L. (2004). *Estimación del Factor de Erosividad de las Precipitaciones en la Región de Coquimbo*. *Simposio Chileno de Física*. Antofagasta; Chile.

VII CENSO AGROPECUARIO Y FORESTAL.(2007).Instituto Nacional de Estadísticas (INE). Recuperado el 1 de Septiembre de 2019, de <https://www.ine.cl/estadisticas/censos/censo-agropecuario-y-forestal-2007>

WISCHMEIER, W. H. (1959). A rainfall index for a universal soil-loss equation. *Pro. Soil. Sci. Soc. Am.*(23), 246-249.

WISCHMEIER, W.H. & SMITH, D.D. (1965) Prediction Rainfall Erosion Losses from Cropland East of the Rocky Mountains: A Guide for Selection of Practices for Soil and Water Conservation. Agricultural Handbook, No. 282, 47 p.

WISCHMEIER, W. H., & SMITH, D. D. (1978). *Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning*. *The USDA Agricultural Handbook No.537*.

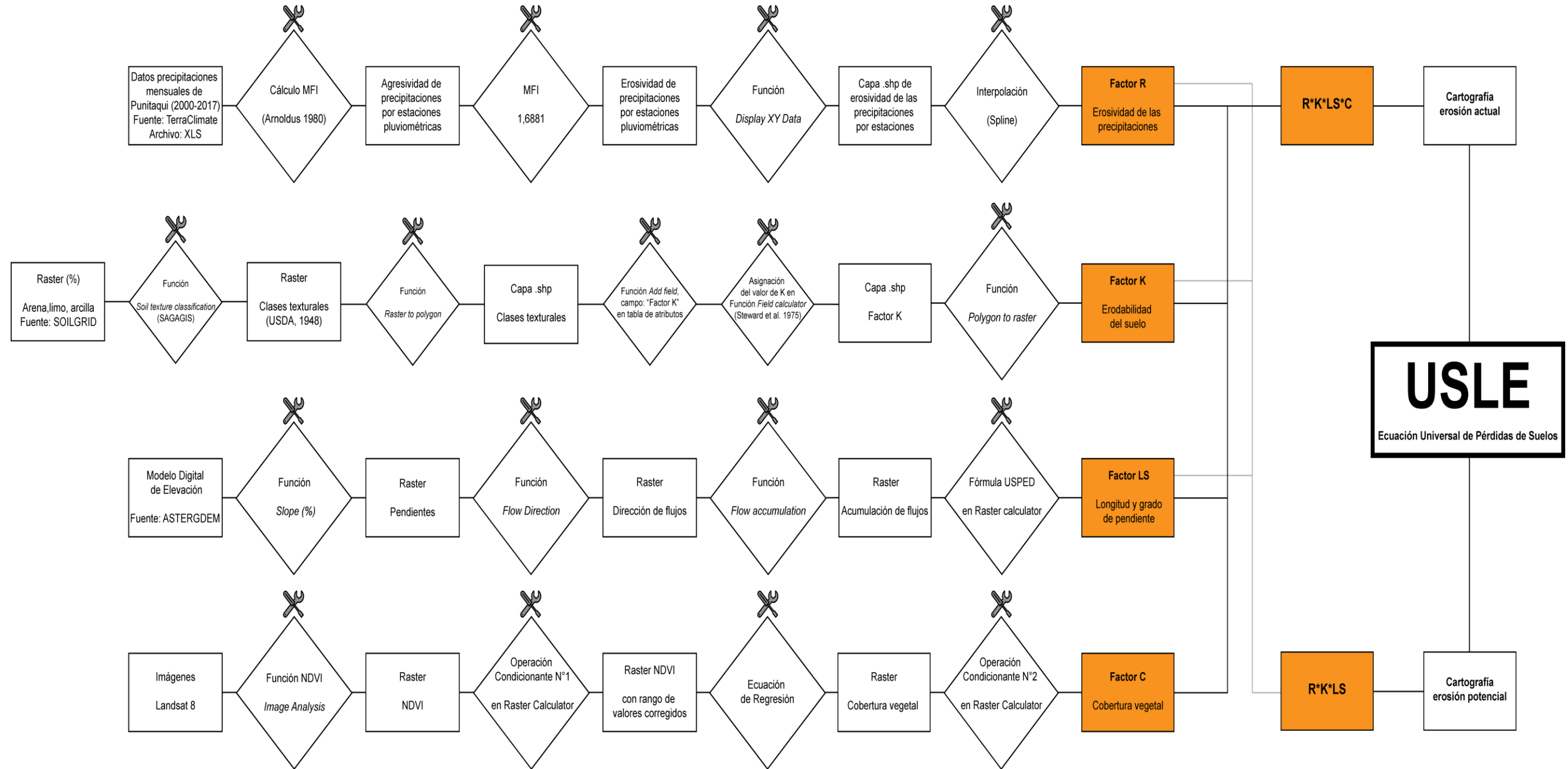
WISCHMEIER, W. H., JOHNSON, C. B., & CROSS, B. V. (1971). A Soil erodibility nomograph form farmland and constructions sites. *J. Soil and Water Conserv*(26), 189-193.

WORDOFA, G. (2011). *Soil Erosion Modeling Using GIS and RUSLE on The Eurajoki Watershed Finland*. Tampere University of Applied Sciences, Department of Enviromental Engineering, Tampere.

YAPUR, S. (2010). *Determinación de la Erosión Hídrica Potencial de los Suelos de la Cuenca Inferior del Río Bermejo, Salta-Jujuy*. Tesis de Grado, Universidad Nacional de Salta, Facultad de Ciencias Naturales, Ingeniería en Recursos Naturales y Medio Ambiente, Salta.

## Anexos

Anexo 1 Síntesis de Modelo USLE aplicado en Punitaqui (Diagrama de procesos)



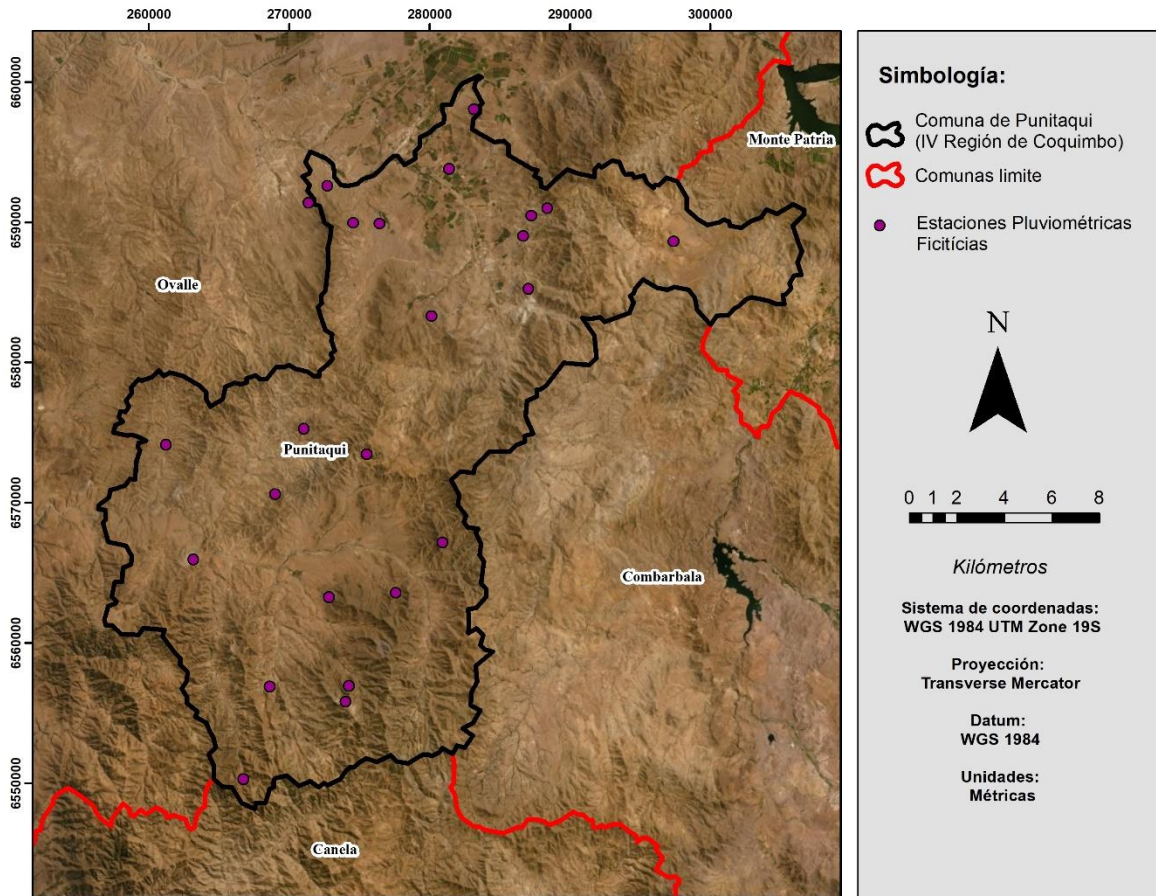
Fuente. Elaboración propia

### Anexo 2 Coordenadas estaciones pluviométricas ficticias

Estación pluviométrica ficticia	X	Y
1	-71,2301	-30,8127
2	-71,3894	-30,7884
3	-71,2269	-30,8466
4	-71,2236	-30,7996
5	-71,11822	-30,81803
6	-71,3564	-30,8019
7	-71,3749	-30,7777
8	-71,3499	-30,9511
9	-71,48102	-31,01608
10	-71,3696	-31,11
11	-71,2948	-31,0089
12	-71,4472	-31,1582
13	-71,2649	-30,7304
14	-71,21167	-30,7952
15	-71,42616	-31,09895
16	-71,36689	-31,09968
17	-71,33693	-30,80271
18	-71,28427	-30,76846
19	-71,49941	-30,94209
20	-71,3805	-31,0423
21	-71,2995	-30,863
22	-71,419	-30,9755
23	-71,3304	-31,0406
24	-71,3963	-30,9337

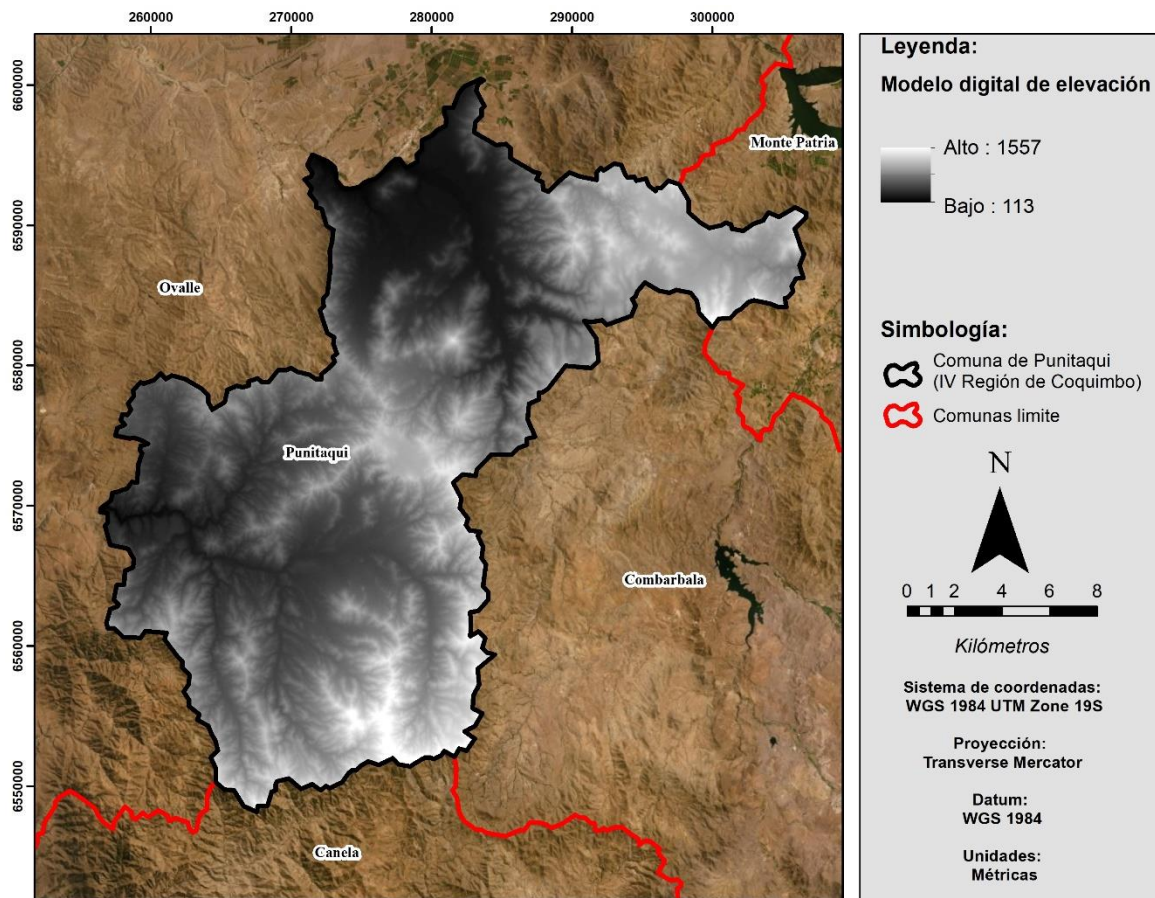
Fuente: Elaboración propia

### Anexo 3. Mapa de estaciones pluviométricas ficticias



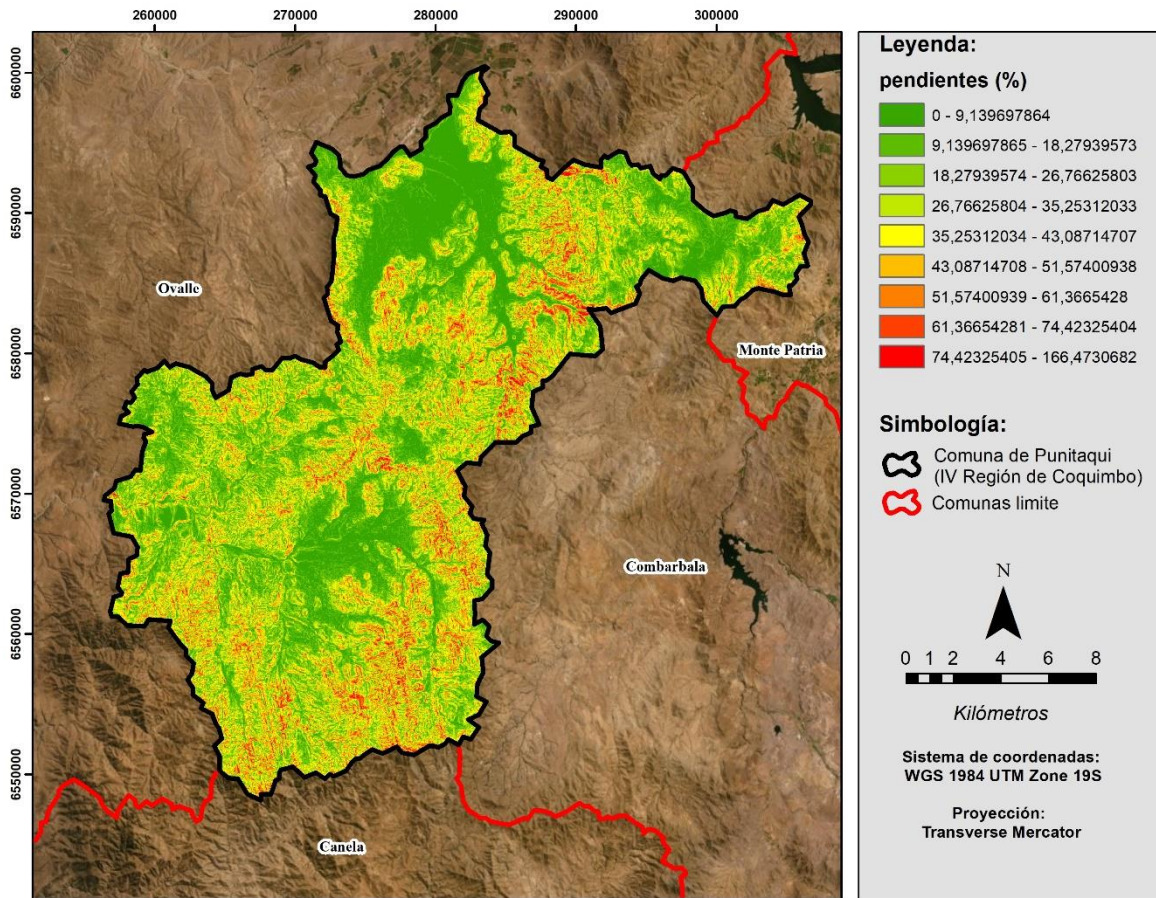
Fuente: Elaboración propia

### Anexo 4 Modelo digital de elevación



Fuente: Elaboración propia

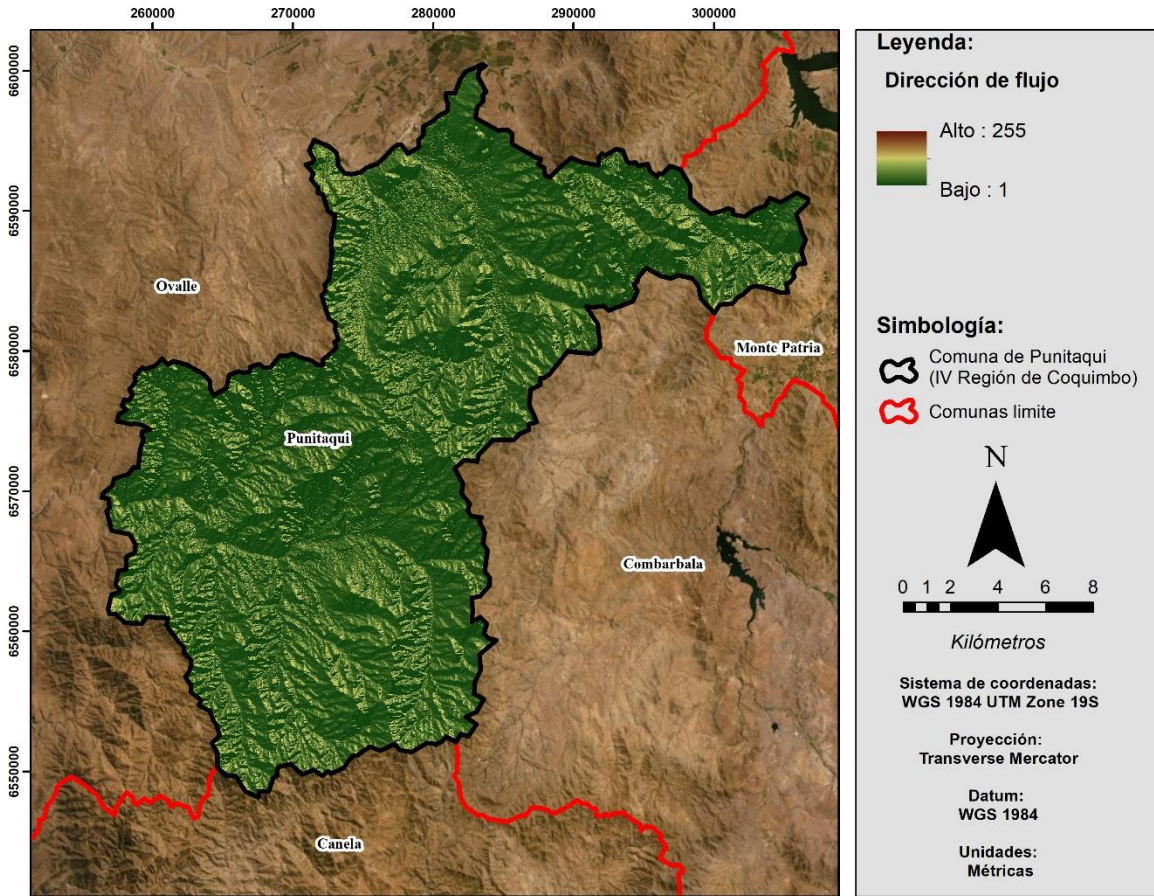
### Anexo 5: Mapa de pendientes



Fuente: Elaboración propia

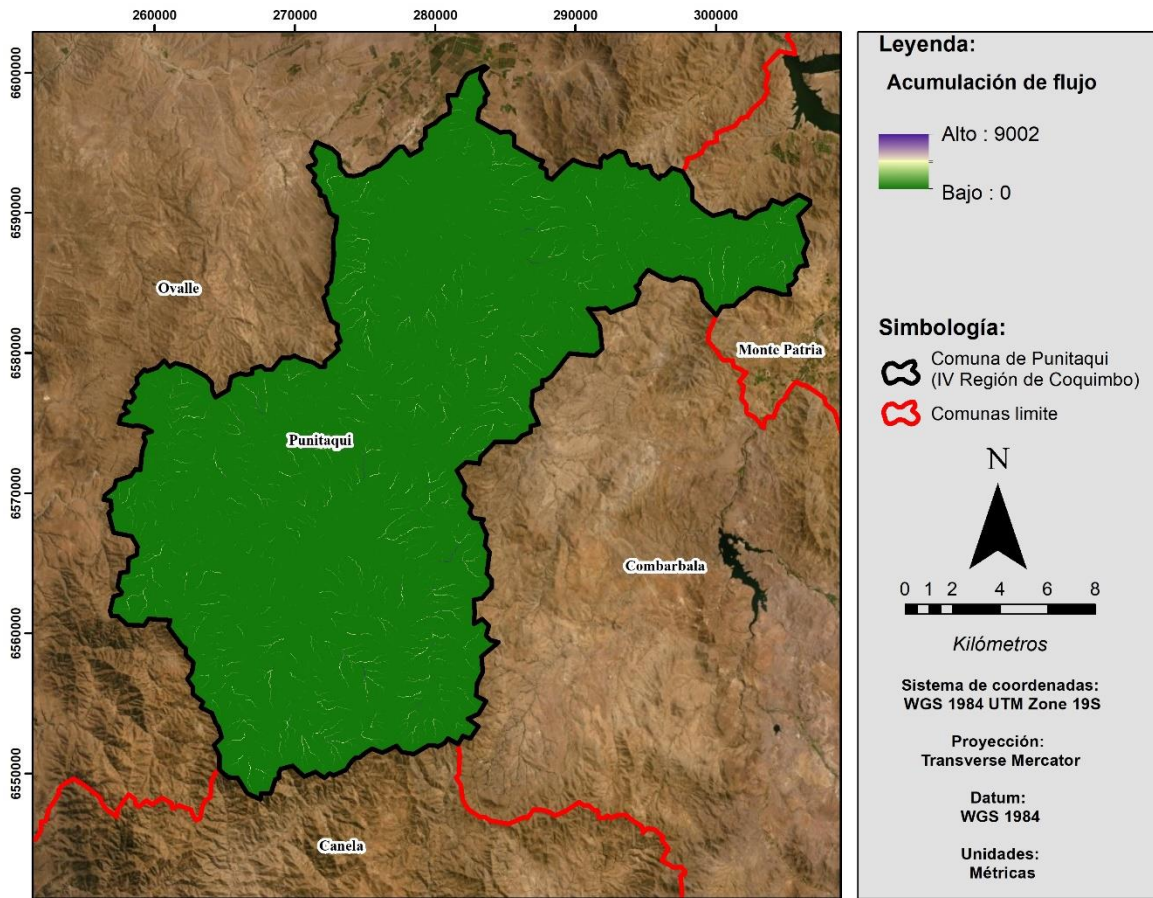


### Anexo 6 Mapa de dirección de flujo



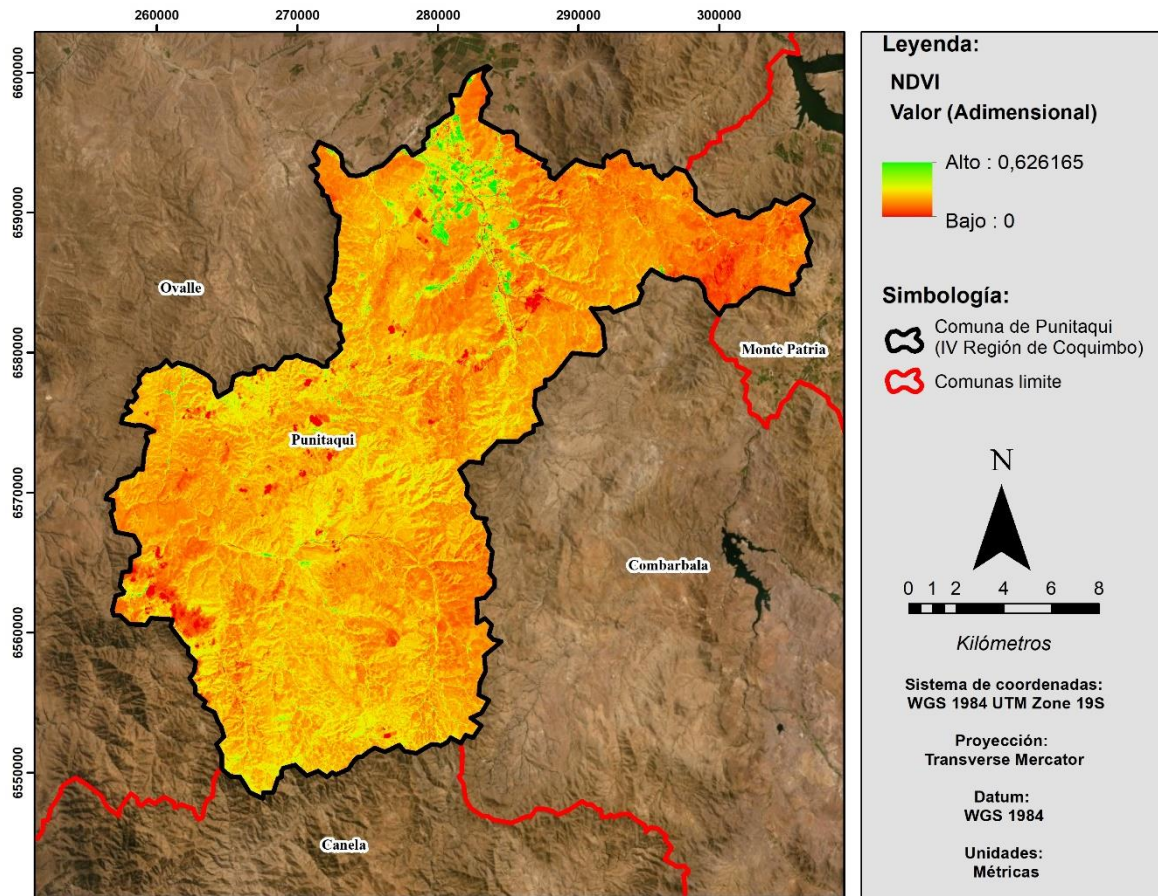
Fuente: Elaboración propia

### Anexo 7 Mapa de acumulación de flujo



Fuente: Elaboración propia

### Anexo 8 Índice de Diferencia Normalizada de Vegetación



Fuente: Elaboración propia