



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

**MEMORIA PARA OPTAR AL TITULO PROFESIONAL DE GEOGRAFO**

**EVALUACION ESPACIAL DE PROCESOS EROSIVOS Y SU  
INFLUENCIA SOBRE EL CORREDOR DE COMERCIO LAS LEÑAS  
VI Región del Libertador Gral. Bernardo O'Higgins**

**Autor:** Roberto Fernández Torres.

**Profesor Guía:** Carmen Paz Castro Correa.

Santiago, marzo 2006

EVALUACION ESPACIAL DE PROCESOS EROSIVOS Y SU INFLUENCIA SOBRE EL  
CORREDOR DE COMERCIO LAS LEÑAS

**INDICE**

<b><u>CAPITULO</u></b>	<b><u>Nº PAGINA</u></b>
<b>RESUMEN.....</b>	<b>3</b>
<b>CAPITULO 1. PRESENTACIÓN.....</b>	<b>4</b>
1.1 INTRODUCCIÓN.....	4
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	5
1.3 AREA DE ESTUDIO.....	7
1.4 OBJETIVOS.....	9
1.4.1 Objetivo General	9
1.4.2 Objetivos Específicos	9
1.5 HIPOTESIS DE TRABAJO.....	9
<b>CAPITULO 2. PLANTEAMIENTO METODOLOGICO.....</b>	<b>10</b>
2.1 MÉTODOS.....	10
2.1.1 Unidades de Referencia a la Erosión (ERefUs)	10
2.1.2 Factores Físico Naturales y Tratamiento Metodológico	13
2.1.3 Superposición y Ponderación de Variables	17
2.2 PASOS METODOLÓGICOS.....	20
2.3 MATERIALES Y TERRENOS.....	21
<b>CAPITULO 3. ESTADO DEL ASUNTO.....</b>	<b>22</b>
3.1 DINÁMICA DE LA EROSIÓN.....	22
3.1.1 Erosividad	24
3.1.2 Erodabilidad	25
3.2 GEODINÁMICA EN AMBIENTES DE MONTAÑA.....	26
3.2.1 Sistema de Vertientes	27
3.2.2 Formas Basales de Contacto	28
3.2.3 Formas Fluviales	29
3.3 FORMAS DE EROSIÓN EN AMBIENTES DE MONTAÑA.....	29
3.3.1 Remoción en Masa	29
3.3.2 Erosión Hídrica	32
<b>CAPITULO 4. RESULTADOS.....</b>	<b>35</b>
4.1 DEFINICIÓN DE EREFUS PARA EL AREA DE ESTUDIO.....	35
4.1.1 Densidad Vegetal	35
4.1.2 Tipo de Vegetación	38
4.1.3 Posición Geomorfológica de la Vegetación	40
4.1.4 Determinación de ERefUs en el Área	41

**EVALUACION ESPACIAL DE PROCESOS EROSIVOS Y SU INFLUENCIA SOBRE EL  
CORREDOR DE COMERCIO LAS LEÑAS**

4.2 VARIABLES FÍSICO NATURALES.....	46
4.2.1 Características Pluviales.....	46
4.2.2 Características Topográficas.....	50
4.2.3 Características Geológicas.....	54
4.2.4 Características Misceláneas Superficiales.....	58
4.3 DEFINICION DE ERUs PARA EL AREA DE ESTUDIO.....	68
4.3.1 Análisis Jerarquizado.....	68
4.3.2 Determinación de ERUs en el Área.....	69
4.4 SUSCEPTIBILIDAD EROSIVA PARA EL AREA DE ESTUDIO.....	71
<b>CAPITULO 5. DISCUSION.....</b>	<b>78</b>
<b>CAPITULO 6. CONCLUSIONES.....</b>	<b>80</b>
<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>82</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>86</b>

**INDICE DE CARTAS**

<b><u>Nº FIGURA</u></b>	<b><u>Nº PAGINA</u></b>
FIGURA 1. AREA DE ESTUDIO.....	8
FIGURA 4. CARTA GEOMORFOLOGICA.....	14
FIGURA 10. CARTA DE NDVI.....	36
FIGURA 11. CARTA DE COBERTURA VEGETAL.....	37
FIGURA 18. CARTA DE UNIDADES DE REFERENCIA A LA EROSION (ERefUs).....	45
FIGURA 19. CARTA DE PRECIPITACIONES MEDIAS ANUALES Y MENSUALES.....	47
FIGURA 20. CARTA DE EROSIVIDAD PLUVIAL.....	49
FIGURA 21. CARTA DE EXPOSICION A LA PRECIPITACION.....	51
FIGURA 22. CARTA DE PENDIENTE SEGÚN UMBRAL GEOMORFOLOGICO.....	53
FIGURA 23. CARTA DE UNIDADES GEOLOGICAS.....	57
FIGURA 26. CARTA DE FORMACIONES SUPERFICIALES.....	67
FIGURA 28. CARTA DE UNIDADES DE RESPUESTA A LA EROSION (ERUs).....	70
FIGURA 30. CARTA DE SUSCEPTIBILIDAD EROSIVA.....	72
FIGURA 31. CARTA DE SUSCEPTIBILIDAD EROSIVA POR TRAMOS.....	73

## **RESUMEN**

Esta investigación se enfoca en la necesidad de evaluar espacialmente los procesos erosivos y su influencia sobre el corredor de comercio Las Leñas, en el valle de baja, media y un sector de alta montaña del río Cachapoal, en términos de las características físico – naturales que intervienen en su generación, como también en la organización actual y potencial de estos procesos en el área.

La comprensión de la erosión desde una perspectiva morfodinámica, vale decir en función de las interacciones generadas entre los elementos físicos – naturales, permite entender a la erosión como un sistema donde se producen entradas y salidas de energía y materia, lo que se refleja en el espacio a través de unidades homogéneas.

En este sentido, MÄRKER *et al.* (1999) definió el concepto de Unidades de Respuesta a la Erosión (Erosion Response Units, ERUs), en referencia a las entidades espaciales homogéneas sujetas a diferentes geodinámicas, que resultan de la superposición entre variables y que son utilizadas para la configurando de los escenarios de susceptibilidad erosiva. La aplicación de esta metodología en el área de estudio permitió evaluar este fenómeno y cual es su implicancia sobre las rutas insertas en ambientes de montaña. Se establece que las variables consideradas por MÄRKER *et al.* (2001) en Africa del sur, pueden ser utilizadas en la cuenca alta del río Cachapoal ya que ambos sectores de investigación son de carácter montañoso. Las ERUs utilizan a la erosión actual como una capa de información a través de las Unidades de Referencia a la Erosión (Erosion Reference Units, ERefUs), las que participan del proceso de superposición cartográfica de variables y del análisis espacial.

Las diferencias erosivas encontradas para el valle montañoso del río Cachapoal al utilizar esta metodología, se entiende en función de los pisos altitudinales y las formas del paisaje. Los movimientos en masa se asocian a sistemas de vertientes estructurales de caras libres y a depósitos basales en el ambiente de alta montaña. La erosión lineal, se localiza en vertientes monoclinales estabilizadas por la vegetación, como también en terrazas fluviales ubicadas en los ambientes de baja y media montaña.

Palabras claves: Erosión, Unidades de Respuesta a la Erosión (ERUs), Unidades de Referencia a la Erosión (ERefUs), susceptibilidad a la erosión, pisos altitudinales y valle del río Cachapoal.

## **CAPITULO 1. PRESENTACION**

### **1.1 INTRODUCCION**

Según SOTO *et al.* (2003), en el escenario de globalización económica y de apertura del comercio mundial, en el que se encuentra Chile, la habilitación de rutas de comercio internacional que atraviesen la cordillera de los Andes, es fundamental para la difusión del crecimiento económico a partir del aumento en el intercambio entre puntos nodales. El funcionamiento seguro y permanente de tales rutas, implica la elaboración de diagnósticos que permitan identificar vulnerabilidades e impactos de los fenómenos naturales que ocurren periódicamente en los sectores montañosos.

La ruta que une Chile con Argentina por el paso cordillerano Cristo Redentor, concentra el grueso del intercambio de bienes y personas entre ambos países. Sin embargo, este paso sufre perturbaciones que provocan frecuentes cierres temporales, principalmente en invierno, menoscabando los conceptos de comercio eficiente, operación permanente y seguridad (CUETO, 2001). Por esta razón, la necesidad de una fluida comunicación a través de la cordillera de Los Andes es cada vez mayor, surgiendo la posibilidad de rutas alternativas, como es el caso del *corredor de comercio Las Leñas* en la cuenca alta del río Cachapoal, VI Región, el cual ha sido seleccionado por las autoridades de ambos países para ser habilitado complementariamente al sistema Cristo Redentor (SOTO *et al.*, 2003).

Los sectores montañosos presentan dificultades para la circulación terrestre debido a la presencia de fenómenos naturales propios de estos paisajes, de allí la necesidad de evaluar la geodinámica en ambientes montañosos, considerando los factores físico – naturales determinantes para el desarrollo de procesos como la erosión. Este tipo de investigaciones conlleva la aplicación de métodos que faciliten la comprensión de tales fenómenos.

En estos últimos años se han generado numerosos estudios de erosión, como también se han desarrollado y aplicado diversos modelos erosivos. En este contexto, surge el concepto de *Unidades de Respuesta a la Erosión (Erosion Response Units, ERUs)*, propuesto por MÄRKER *et al.* (1999), quien los ha definido como áreas territoriales geodinámicamente homogéneas, resultado de la superposición de variables físico – naturales para una superficie determinada, lo cual permite conocer la susceptibilidad erosiva de un paisaje.

Esta investigación se centra en la identificación, la clasificación y el análisis de procesos erosivos y su influencia sobre el corredor de comercio Las Leñas, utilizando como unidad espacial el valle del río Cachapoal, y empleando como metodología aquella propuesta por MÄRKER *et al.* en 1999. El presente estudio es relevante en la comprensión de los procesos erosivos en los valles cordilleranos de Chile central, pues fueron consideradas características que interactúan en la geodinámica propia de estos paisajes.

## 1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La determinación de los niveles de riesgo en el corredor de comercio Las Leñas, entre Chile y Argentina, en la VI Región del Libertador General Bernardo O'Higgins, estudiado en el proyecto TNAC 11 – 02/01 (*Determinación de los Niveles de Riesgo Natural en el Corredor de Comercio Las Leñas*), impone un importante desafío en el análisis de los procesos asociados a los sistemas montañosos que podrían incidir negativamente en la óptima operación de la ruta.

La red de transporte terrestre a través de la cordillera de Los Andes posee capacidades limitadas, al igual que los servicios asociados al intercambio de bienes y personas entre Chile y los países de la costa atlántica. Como resultado del crecimiento económico nacional y el incremento del flujo comercial con países como Argentina o Bolivia, se ha hecho necesaria la planificación de nuevas obras de comunicación y transporte internacional a través de la cordillera, debido principalmente a que estos países buscan llevar sus productos a los grandes mercados en el Pacífico, utilizando como salida los puertos chilenos. Este tipo de rutas constituyen una oportunidad para el desarrollo, al favorecer el movimiento de bienes y productos a través de Los Andes, fortaleciendo la posición de los puertos nacionales como puntos de intercambio comercial de nuestra para el cono sur.

Sin embargo, la accesibilidad en las rutas terrestres de montaña está condicionada por una serie de factores de tipo ambiental (características climáticas, topográficas, etc.). La geodinámica de estos paisajes influye sobre la accesibilidad principalmente en invierno, lo cual se refleja en el desarrollo de procesos *morfogenéticos* (flujos, desprendimientos, deslizamientos, etc.). Según CUETO (2001), esta situación se debe tener en cuenta al momento de diseñar nuevas rutas, tratando de minimizar la vulnerabilidad de las infraestructuras, otorgando mejores niveles de seguridad. Para HAUSER (1993), los procesos de erosión y remoción en masa son de gran interés, considerando el carácter recurrente y el daño que este tipo de procesos causa sobre la seguridad y los bienes de las personas. Más aún, son particularmente graves en término de pérdidas de vidas y daños materiales en las zonas andinas y preandinas de Chile central.

En estas últimas décadas, se han producido avances en la elaboración de cartografías asociadas a fenómenos erosivos, los que incluyen la localización y la caracterización de procesos actuales y potenciales a partir del estudio de factores naturales (GOMEZ OREA, 1994). En este contexto, el punto de vista aportado por la geografía entrega una perspectiva más global de los ambientes montañosos, al centrar sus esfuerzos en la influencia de aspectos geomorfológicos, hidrológicos y climáticos sobre la organización del paisaje. Este enfoque permite realizar un análisis desde la dinámica del paisaje, teniendo en cuenta que una parte de ésta se debe atribuir a la utilización humana del territorio (GARCÍA – RUIZ, 1990).

ARAYA – VERGARA (1985) afirma que el grado actual de los procesos morfogenéticos, varía dependiendo de las categorías de las formas del paisaje. Para GONZALEZ *et al.*, (1995), estas formas del relieve se vinculan a los actuales procesos de organización espacial, que son el resultado de la interacción entre los factores medioambientales, especialmente topográficos y litológicos. La actividad actual corresponde a movimientos en masa, procesos derivadas del escurrimiento superficial y fenómenos relacionados a contrastes térmicos. DE PEDRAZA (1996) plantea que la magnitud de los procesos depende de aquellos factores que los controlan. Para SANCHO en PEÑA (1997), la combinación de los elementos terrestres y las unidades geodinámicas del paisaje permite representar una serie de cualidades significativas y útiles en la planificación territorial como son los estados erosivos. Según SOTO *et al.* (2003), el estudio y el mapeamiento de las formas que poseen una alta dinámica actual, y su evaluación en términos de aporte de masa hacia el fondo de los valles, permite localizar y determinar la magnitud de estos fenómenos.

Para MORGAN (1997), una metodología más directa para mejorar el conocimiento de la dinámica erosiva, es cartografiar sus rasgos actuales como también los factores que influyen en ella. De acuerdo a los planteamientos hechos por YOUNG (1977), el análisis de estos procesos es a través de un enfoque descriptivo que permita caracterizar la geodinámica en vertientes, y así establecer relaciones y generalizaciones aplicables a un territorio.

En este sentido, un acercamiento innovador para caracterizar la dinámica de la erosión causada por la hidrológica de una cuenca, lo introdujo MÄRKER *et al.* (1999) y FLUGET *et al.* (1999) con el concepto de Unidades de Respuesta a la Erosión (ERUs), el cual fue aplicado por MÄRKER *et al.* (2001) en la identificación, el pronóstico y el análisis espacial de la erosión en las cuencas de los ríos Mkomazi (República de Sudáfrica) y Mbuluzi (Reino de Swazilandia), dentro del proyecto interdisciplinario EU-consolidado. Las ERUs son entidades con una condición erosiva determinada, elaboradas a partir de la identificación de los parámetros físico que controlan la geodinámica en cada paisaje y la identificación de las Unidades de Referencia a la Erosión (Erosion Reference Units, ERefUs) que describen los procesos y las formas de erosión existentes, todo lo cual funciona como un ecosistema que controla la distribución espacial de la erosión.

*El propósito de este trabajo es determinar Unidades de Respuesta a la Erosión (ERUs) para evaluar los procesos y las formas de erosión en el valle de baja y media montaña del río Cachapoal, y un tramo de la sección alta, identificando las características físico – naturales, la geodinámica presente y principalmente la susceptibilidad erosiva, a nivel de sistemas de vertientes, formas de contacto y formas fluviales, con la finalidad de favorecer la planificación del corredor Las Leñas.*

La posibilidad de utilizar en el área de estudio los parámetros empleadas por MÄRKER *et al.* (2001) en el análisis de las cuencas sudafricanas, se debe a que ambas zonas pertenecen a paisajes montañosos donde es posible encontrar diferentes ambientes y pisos altitudinales, por lo cual las variables que interactúan en los procesos de erosión son similares.

### 1.3 AREA DE ESTUDIO

El área estudiada corresponde al último tramo de la ruta de comercio Las Leñas en la cordillera de los Andes, localizado en el valle del río Cachapoal. Este sector posee una superficie aproximada de 336,6 km<sup>2</sup> (33.660 hectáreas), siendo los límites el embalse El Sauzal y la confluencia del río Las Leñas (6.192 km. – 6.220 km. Latitud UTM y 351 km. – 379 km. Longitud UTM), en la Comuna de Machalí, Provincia de Cachapoal, en la VI Región del Libertador General Bernardo O'Higgins. Comprende las desembocaduras de las cuencas tributarias de los ríos *Claro de Cauquenes*, *Coya*, *Pangal*, *de Los Cipreses*, *Cortaderal* y *Las Leñas* (FIG.1). La altitud en fondo de valle fluctúa entre 600 y 1.000 m.s.n.m., y en la línea de altas cumbres va desde 2.000 a 3.000 m.s.n.m.

Esta parte del valle del río Cachapoal pertenece fundamentalmente a paisajes de baja y media montaña. En este sentido, CASTRO *et al.* (2003) determinó el límite entre los pisos montañosos del área según criterios de altura, pendiente, vegetación, ambientes morfoestructural y tectónico. El límite superior de la baja montaña está en la confluencia del río Pangal, que marca el término de la vegetación arbórea y también la disminución altimétrica y de pendientes. La intersección entre alta y media montaña está en la confluencia del río de Los Cipreses, donde se superponen el límite de la vegetación, el ambiente morfoestructural y la zona geomorfológica de influencia glacial.

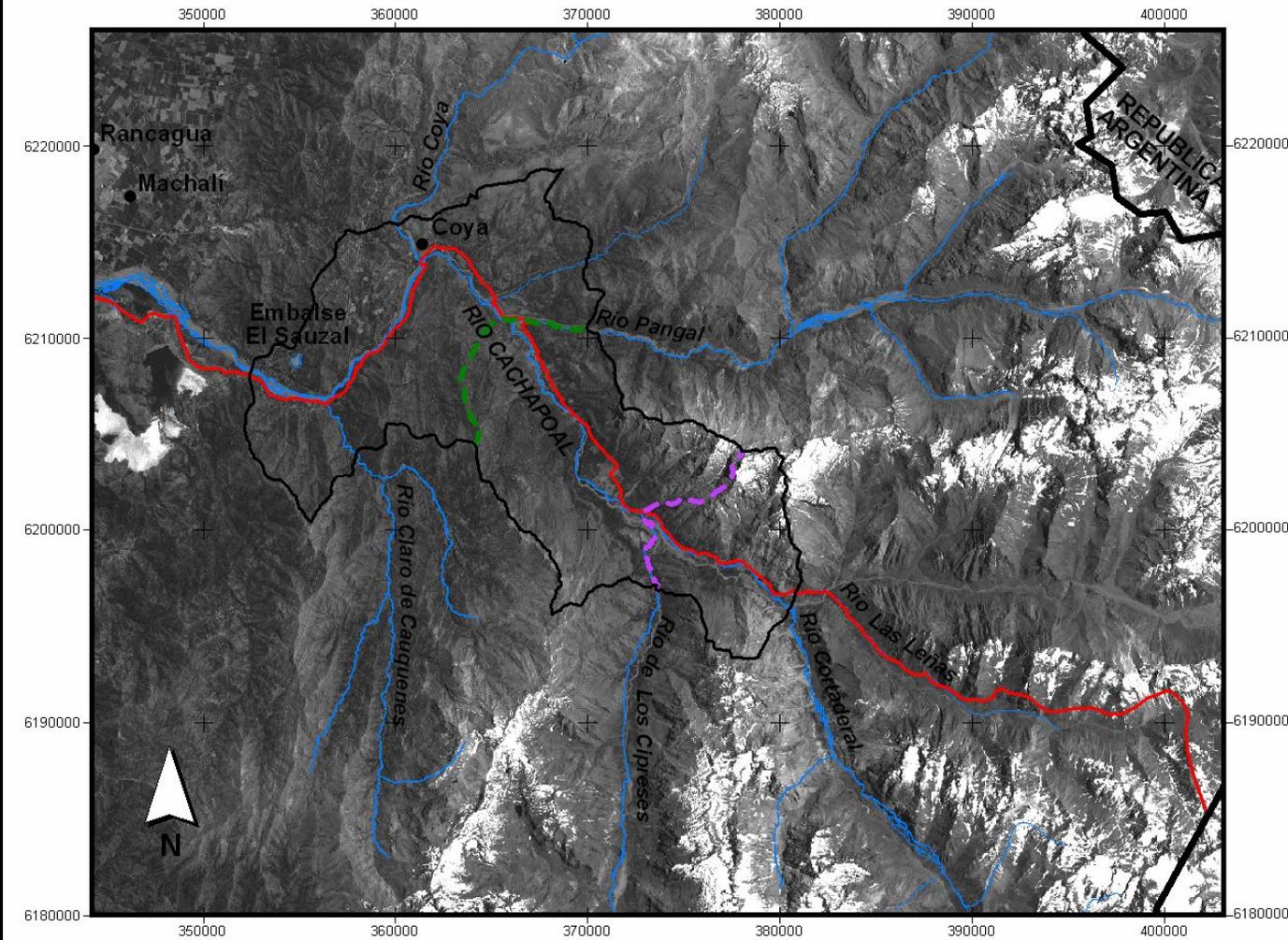
El sistema general de la sección cordillerana del río Cachapoal pertenece a un paisaje montañoso, resultado de procesos que poseen edades y génesis diferentes como son el solevantamiento y el plegamiento endógeno terciario, el modelado glacial y aquellos procesos exógenos que dinamizan el sistema (SOTO y CASTRO; 2003a, 2003b). En media montaña las condiciones son menos rigurosa con respecto a la sección alta, los sistemas de vertientes están marcados por la estructura, y si bien se presentan con relieves escarpados y de fuerte pendiente, están protegidos por una cubierta de suelo y vegetación (SOTO *et al.*, 2004). En baja montaña las formaciones superficiales también enmascaran la estructura, disminuyendo la detritificación y el aporte de material desde las vertientes (CASTRO *et al.* 2003).

Climáticamente la VI Región se localiza en un ambiente templado, caracterizado por una estacionalidad marcadamente seca en verano y lluviosa durante el invierno, donde el relieve montañoso ejerce un efecto orográfico importante. Según el IGM (1985), la cordillera de los Andes posee mayores montos pluviométricos y menores temperaturas, en comparación a las otras macroformas del relieve, de tal manera acumula nieve en cumbres y laderas durante los meses invernales. Por esta razón, hidrográficamente el río Cachapoal posee un régimen pluvio – nival, con crecidas durante el invierno por las precipitaciones y al comienzo de la primavera por los deshielos.

Se trata de una zona sin uso actual, por lo cual se analizó un paisaje donde el sistema natural casi no ha sido intervenido por la acción antrópica. El único centro poblado a lo largo del corredor Las Leñas, en el área de estudio, corresponde a la localidad de Coya, la que posee la categoría de pueblo con 2.932 habitantes según el Censo de Población y Vivienda (INE, 2002).

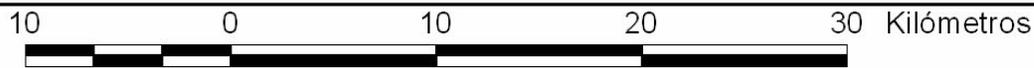
FIGURA 1: AREA DE ESTUDIO, VALLE DEL RIO CACHAPOAL.

UBICACION DEL AREA



Leyenda

- Area de estudio
- Limite internacional
- Ruta corredor de comercio
- Rio
- Limite baja-media montaña
- Limite media-alta montaña
- Asentamientos



1:300.000

Fuente: Elaborado por el autor.

## **1.4 OBJETIVOS**

### **1.4.1 Objetivo General**

Evaluar espacialmente los procesos erosivos asociados a la dinámica de baja, media y alta montaña, mediante determinación de *Unidades de Respuesta a la Erosión (ERUs)* en el valle andino del río Cachapoal, corredor de comercio Las Leñas.

### **1.4.2 Objetivos Específicos**

- ❖ Identificar la erosión existente en la sección de baja, media y alta montaña del valle del río Cachapoal.
- ❖ Identificar los factores físico-naturales que influyen en los procesos erosivos del sector en estudio.
- ❖ Elaborar áreas homogéneas con similar comportamiento erosivo en la sección de baja, media y alta montaña del valle del río Cachapoal.
- ❖ Determinar y analizar la susceptibilidad erosiva de las unidades homogéneas para el área en estudio.

## **1.5 HIPOTESIS DE TRABAJO**

La distribución espacial de los procesos y las formas de erosión está controlada por las propiedades físico-naturales (MÄRKER *et al.*, 2001). Por consiguiente, las respuestas erosivas serán diferentes en aquellas unidades territoriales insertas en ambientes montañosos de influencia estructural, a nivel de sistemas de vertientes, formas basales de contacto y formas fluviales.

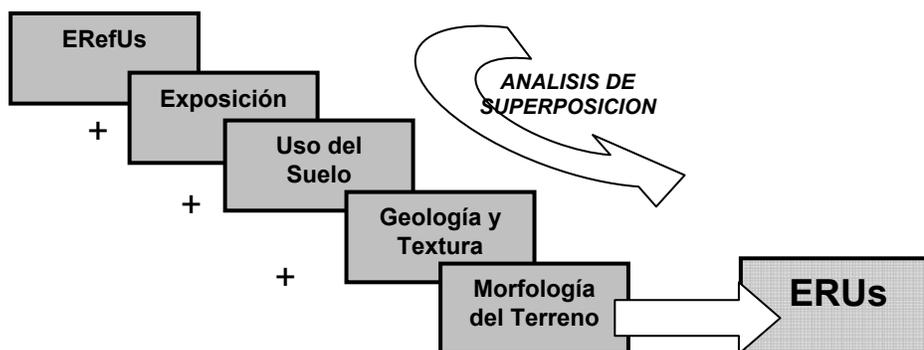
## **CAPITULO 2. PLANTEAMIENTO METODOLOGICO**

### **2.1 METODOS**

Se utilizó como metodología general el proceso aplicado en las cuencas pertenecientes a los ríos *Mkomazi (República de Sudáfrica)* y *Mbuluzi (Reino de Swazilandia)*, para analizar los recursos hídricos y el modelado de cuencas frente a eventos erosivos, lo cual fue publicado en el artículo “*Evaluación de los Procesos y las Dinámicas Erosivas del Agua en las Regiones Semiáridas de África del Sur (Kwazulu/Natal, República de Sudáfrica y Swazilandia), utilizando el Concepto de Unidades de Respuesta a la Erosión (ERUs)*” de MÄRKER, MORETTI y RODOLFI (2001). Además, la metodología fue complementada a través del análisis multivariado de información.

Según DE PEDRAZA (1996), para la delimitación de áreas con riesgo erosivo se deben agrupar las unidades sectoriales de cada factor, obteniendo así unidades integradas. La técnica es la superposición cartográfica de variables, que puede ser manual o mediante cálculo automático (hoja de cálculo o SIG). Esto se realiza combinando los diferentes mapas descriptivos, lo que genera mapas representativos de cualidades significativas para el territorio (CENDERO *et al.* en PEÑA 1997). En la metodología aplicada por MÄRKER *et al.* (2001), las unidades homogéneas de erosión (ERUs) resultan de la superposición entre las diferentes capas de información físico – natural y las unidades de erosión existente denominadas ERefUs (FIG.2).

**FIGURA 2: SUPERPOSICION Y PARAMETROS UTILIZADOS PARA LA DETERMINACION DE ERUs EN LA CUENCA SUPERIOR DEL RIO MKOMAZI (REPUBLICA DE SUDAFRICA).**



Fuente: MÄRKER *et al.* (2001).

#### **2.1.1 Unidades de Referencia a la Erosión (ERefUs)**

De acuerdo al autor, la identificación y la localización de las formas erosivas existentes (ERefUs), se realiza clasificando los tipos y las intensidades degradacionales en función de la densidad vegetal (Tabla 1), esta se realiza mediante fotointerpretación, análisis de información obtenida en terreno y de las ortofotos, como también mediante SIG.

**TABLA 1: CLASIFICACIÓN DE LOS TIPOS Y LAS INTENSIDADES EROSIVAS CON RESPECTO A LA COBERTURA VEGETAL (MODIFICADO SEGÚN VAN ZUIDAM, 1985).**

Clase ERefUs	Intensidad de la Erosión	Tipo de Erosión	Cobertura Vegetacional en %	Área Degradada en %
1	Ninguna	-	>90	<10
2	Ligera	Canalizada-precanalizada ligera	>75	<25
3	Ligera - moderada	Canalizada-precanalizada; cárcavas poco profundas	>75	<25
4	Moderada	Canalizada; cárcavas medias profundas	51-75	25-49
5	Severa	Canalizada; cárcavas medias profundas y profundas; deslizamientos de tierra	26-50	50-74
6	Muy severa	Canalizada; cárcavas profundas; tierras malas, movimientos en masa severos	<25	>75

Fuente: MÄRKER *et al.* (2001).

Para esta investigación, la clasificación de ERefUs no solo consideró aquellos rangos de densidad vegetal propuestos por MÄRKER *et al.* (2001), pues esta información fue complementada con los antecedentes geomorfológicos del área. Por lo tanto, se buscó relacionar estas dos características físico – naturales, lo que fue representado a escala 1:150.000 con apoyo del software ARC VIEW 3.2.

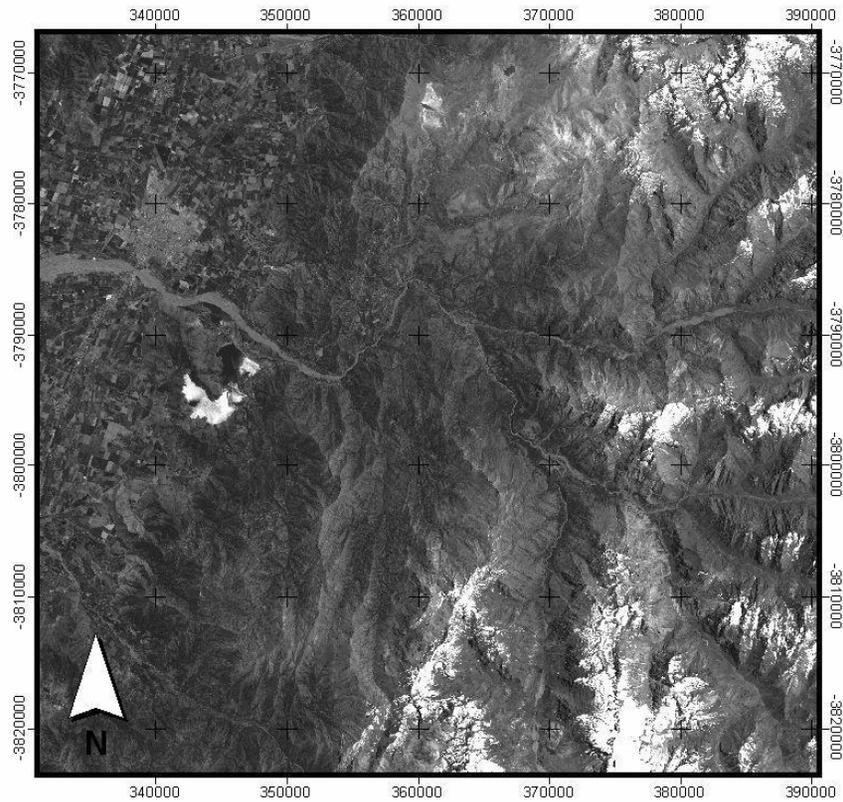
La densidad vegetacional se determinó a partir del *Índice Normalizado de Diferencias Vegetales (Normal Difference Vegetal Index, NDVI)*, obtenido de las bandas 03 y 04 de la imagen satelital LANDSAT 7 ETM (Tamaño píxeles de 30 x 30 metros), correspondiente al año 1999 (FIG.3), mediante el software IDRISI 32. A esto se debe agregar el análisis de fointerpretación y la corroboración de información en terreno.

Según ALONSO *et al.* (1996), este índice permite conocer sectores con gran densidad vegetal (valores cercanos a 1), otros de menor densidad (cifras entorno a 0) y sectores con nieve o agua (valores cercanos a -1). Para CHUVIECO (2002), un aspecto de interés que posee este índice es el que fluctúe entre valores conocidos, facilitando notablemente su interpretación. Por esta razón, el NDVI permite la identificación de la erosión presente en función de la vegetación, entregando una base cuantitativa para la clasificación de rangos de densidad.

Los tipos de vegetación asociados a la cobertura, fueron determinados según los pisos fitogeográficos de la cordillera de los Andes en Chile central (Tabla 2), definidos por QUINTANILLA (1983), los que se ratificaron mediante observación en terreno.

FIGURA 3: BANDAS SATELITALES IMAGEN LANDSAT 7 ETM, VALLE DEL RIO CACHAPOAL.

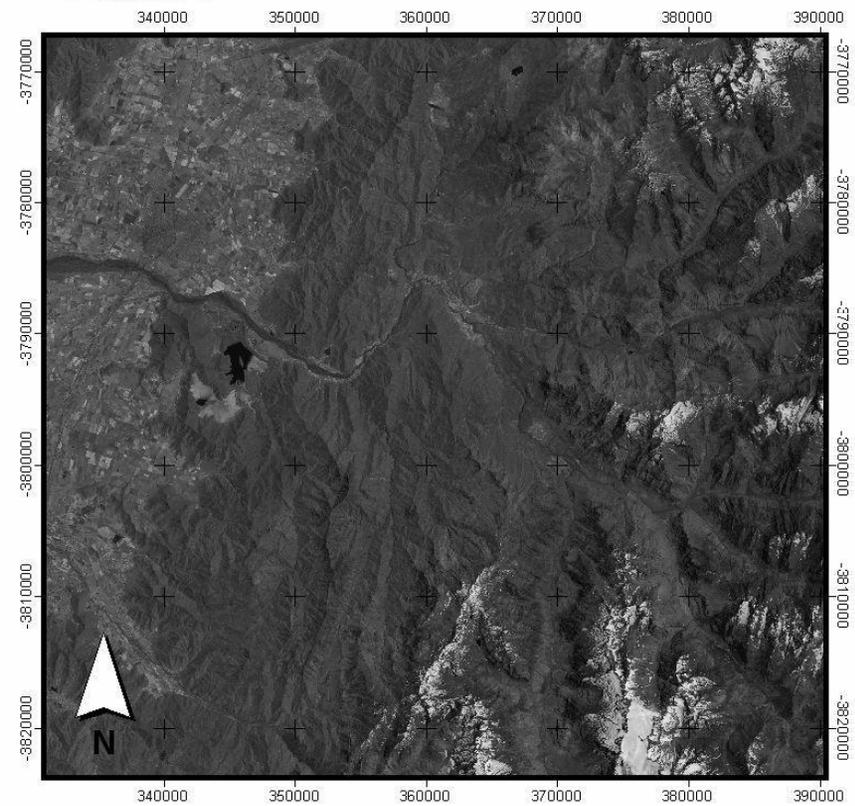
**Banda 3**



Fuente: IDE 035-215, EERTH SAT (1999).



**Banda 4**



**TABLA 2: PISOS FITOGEOGRAFICOS EN LA CORDILLERA ANDINA DE CHILE CENTRAL.**

Piso Fitogeográfico	Tipo de Vegetación	Altura
Piso montañoso inferior	Matorral esclerófilo intervenido	500 a 700 m.s.n.m.
Piso montañoso superior	Bosque esclerófilo degradado	700 a 1.200 m.s.n.m.
Piso subandino	Matorral subandino	1.200 a 1.700 m.s.n.m.
Piso andino inferior	Estepa y vegas andinas	1.700 a 2.500 m.s.n.m.
Piso andino superior	Gramíneas y plantas reptantes	Sobre los 2.500 m.s.n.m.

Fuente: QUINTANILLA (1983).

El análisis geomorfológico se realizó a partir de la carta de CHAVEZ (2005) para el valle del río Cachapoal, sección de media y baja montaña (FIG.4). Este análisis se basó en la clasificación de vertientes propuesta por ARAYA – VERGARA (1985), concebida como fundamental para la comprensión de los procesos morfogenéticos actuales.

### 2.1.2 Factores Físico Naturales y Tratamiento Metodológico

Esta metodología requiere la identificación de las capas de información físico – natural relevantes para el potencial desarrollo de procesos y formas de erosión en un paisaje determinado. Para este estudio, los factores empleados fueron seleccionados a partir de aquellos utilizados por MÄRKER *et al.* (2001) en el sur de África. En este sentido, el uso de suelo no fue considerado pues el área ha sido escasamente intervenida por el hombre, principalmente la media y la alta montaña.

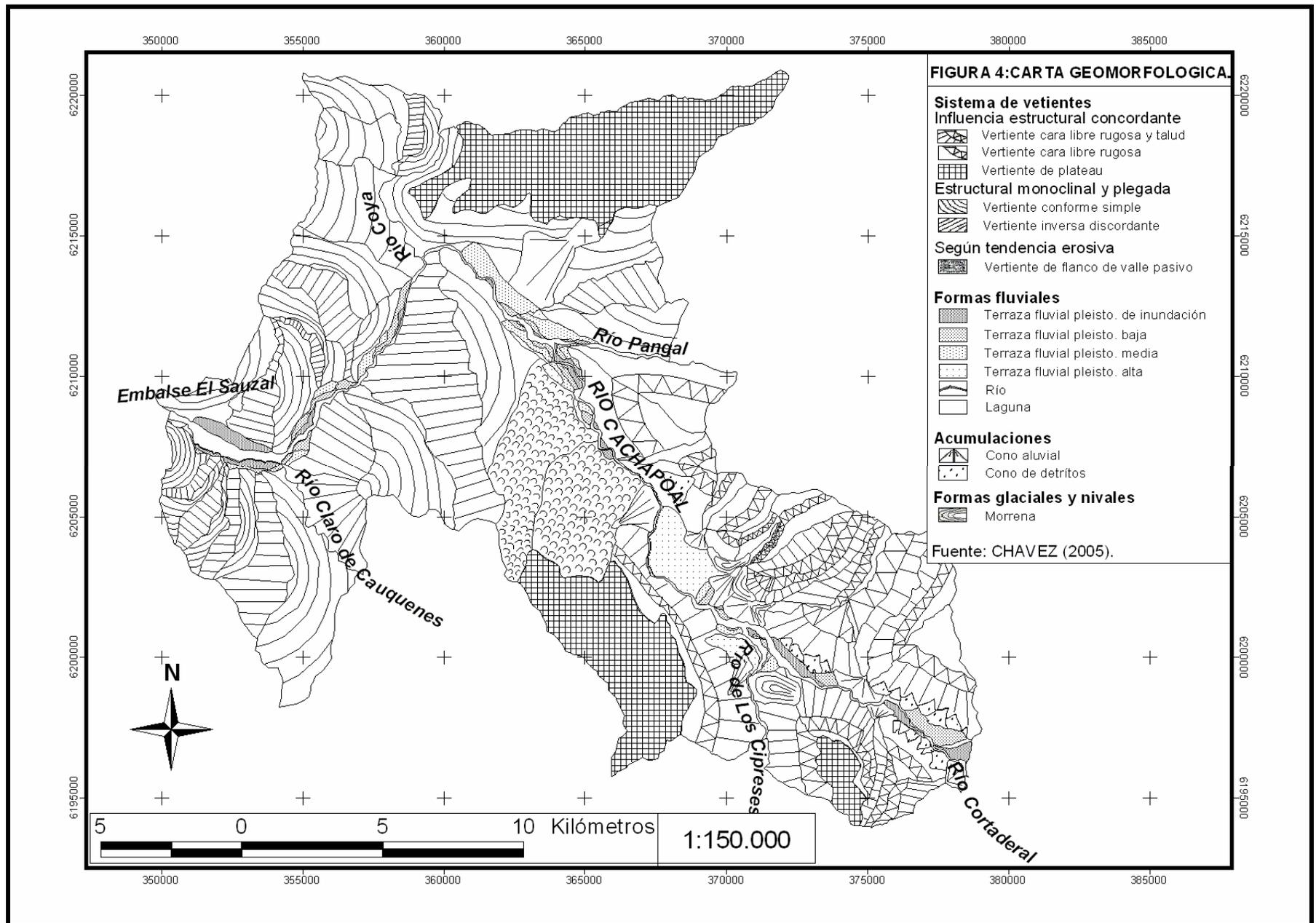
Aquellas variables utilizadas fueron *precipitación, topografía (exposición y pendiente), geología y características misceláneas superficiales*, representadas cartográficamente a escala 1:150.000, mediante la implementación del software ARC VIEW 3.2. Para esto, se implementaron algunos procesos metodológicos y ciertas clasificaciones:

a) *Precipitación*: Para el análisis de esta variable fue utilizado el *Índice de Erosividad o Agresividad Pluvial* de FOURNIER (1960), correspondiente a la relación  $p^2/P$ , donde  $p$  es la *mayor precipitación media mensual* y  $P$  es la *precipitación media anual*. Este es un índice de concentración a nivel mensual, que asocia erosividad y precipitación según la intensidad pluviométrica. De acuerdo a MORGAN (1997), los valores de agresividad pueden ser agrupados en rangos que son bajo, medio y alto (Tabla 3).

**TABLA 3: RANGOS DE EROSIVIDAD PLUVIAL DE FOURNIER (1960).**

Erosividad Media	Grado de Erosividad
$< 25 p^2/P$	Bajo
$25 p^2/P - 50 p^2/P$	Medio
$> 50 p^2/P$	Alto

Fuente: MORGAN (1997).



Este índice fue utilizado debido a los escasos antecedentes pluviométricos disponibles, por lo tanto la información obtenida es de carácter general. La erosividad pluvial se determinó gracias a los datos entregados por el Balance Hídrico de Chile (MOP – DGA, 1987), donde las isoyetas de precipitación media anual del Mapa Santiago, escala 1:500.000, fueron utilizadas como base cartográfica para la representación espacial del índice en cuestión, mediante digitalización en el software ARC INFO 3.2.

Respecto a la precipitación mensual, por la falta de información, fue necesario el cálculo de los montos aproximados del mes más lluvioso en el área, utilizando un porcentaje de referencia. De las estaciones pluviométricas presentes en el valle del río Cachapoal que son *Central Sauzal, Parrón, Pangal Casa de Fuerza y Coya*, solo la última posee datos de precipitación media mensual (Tabla 4), donde julio concentra el mayor porcentaje anual con el 22,9%, cifra calculada para cada isoyeta de precipitación media anual.

**TABLA 4: PRECIPITACIÓN MEDIA MENSUAL PARA LA ESTACIÓN PLUVIOMÉTRICA COYA.**

Mes	Precipitación Media Mensual (mm)
Enero	3
Febrero	1
Marzo	9
Abril	37
Mayo	114
Junio	156
Julio	<b>157</b>
Agosto	93
Septiembre	55
Octubre	28
Noviembre	17
Diciembre	11
<b>Precipitación Media Anual (mm)</b>	<b>686</b>

Fuente: MOP – DGA (1987). Datos correspondientes al período de registro 1951 – 1980.

*b) Topografía:* El análisis topográfico se dividió entre *pendiente y exposición*, las que fueron determinadas a partir de las cartas regulares del IGM, escala 1:50.000, mediante el *Modelo Digital de Elevación (Digital Elevation Model, DEM)*, utilizando el software ARC VIEW 3.2, con un tamaño de celdas de 25 x 25 metros.

Según el Balance Hídrico de Chile (MOP – DGA, 1987), la importancia de la orografía como agente intensificador de las lluvias a barlovento y de disminución a sotavento, se observa claramente en la cordillera de Los Andes de Chile central y por ende en el área de estudio. Por esta razón, la erodabilidad de cada rango de exposición fue clasificada según la disposición del relieve a las precipitaciones, que en el valle del Cachapoal, de acuerdo a las isoyetas de precipitación media anual, penetran desde el NW, lo que permitió determinar tres tipos de exposición (Tabla 5).

**TABLA 5: RANGOS DE EXPOSICION A LA PRECIPITACION.**

Exposición (Grados Azimutales)	Tipo de Exposición (Ubicación)	Grado de Erodabilidad *
Sur (135° - 225°)	Sotavento	Bajo
Este (45° - 135°)	Sotavento	Bajo
Cenital (Plano)	Cenital	Medio
Norte (315° - 45°)	Barlovento	Alto
Oeste (225° - 315°)	Barlovento	Alto

Fuente: Elaborado por el autor.

\*El grado de erodabilidad fue determinado por el autor de esta investigación.

En el caso de la pendiente se aplicaron los rangos según el umbral geomorfológico de ARAYA – VERGARA & BORGEL (1972), YOUNG (1972) y FERRANDO (1993), a partir de los cuales se determinó el grado de erodabilidad según los procesos asociados para cada rango de pendiente (Tabla 6). Esta variable permitió establecer una proyección dinámica de los fenómenos que ocurren en vertientes y en ambientes de montaña.

**TABLA 6: RANGOS DE PENDIENTE SEGÚN UMBRAL GEOMORFOLÓGICO.**

Grados de Pendiente	Tipo de Pendiente	Umbral Geomorfológico	Grado de Erodabilidad *
0° - 2°	Horizontal	Erosión nula o leve	Bajo
2,1° - 5°	Suave	Erosión débil, difusa (shett wash), inicio de regueros y soliflucción fría.	Bajo
5,1° - 10°	Moderada	Erosión moderada a fuerte, inicio de erosión lineal (rill wash).	Medio
10,1° - 20°	Fuerte	Erosión intensa, cárcavas insipientes.	Alto
20,1° - 30°	Moderadamente escarpada	Cárcavas frecuentes, movimientos en masa, reptación.	Alto
30,1° - 45°	Muy escarpada	Coluviamiento, soliflucción intensa.	Muy Alto
> 45°	Acantilada	Desprendimientos, derrumbes, corredores de derrubios.	Muy Alto

Fuente: ARAYA – VERGARA & BORGEL (1972), YOUNG (1972) y FERRANDO (1993).

\*El grado de erodabilidad fue determinado por el autor de esta investigación.

c) *Geología*: Las unidades geológicas fueron identificadas y analizadas, a partir de las cartografías de CHARRIER (1983) y KLOHN (1960), para el área de estudio.

La clasificación de la erodabilidad potencial de las unidades geológicas, se basó en el criterio diseñado y aplicado por KUHNI y PFIFNER (2001) en los Alpes suizos, usado para examinar el efecto del sollevamiento en la evolución de la red de drenaje, es decir la relación entre hidrología y procesos orógenos en cadenas montañosas. Por esta razón, fue posible aplicar esta clasificación en la cuenca alta del río Cachapoal, pues su evolución también responde a un levantamiento generalizado del continente.

Según estos autores, existe un orden descendente en la erodabilidad de los materiales desde las rocas sedimentarias a las de carácter intrusivo, siendo clasificadas en cuatro rangos que van desde muy bajo a alto (Tabla 7). En este estudio, se utilizó y adaptó la clasificación para las unidades geológicas, las que fueron agrupadas en tres categorías de erodabilidad (alto, medio y bajo), agregando al análisis los sedimentos cuaternarios inconsolidados, que poseen la mayor vulnerabilidad.

**TABLA 7: RANGOS DE ERODABILIDAD.**

Tipo de Roca	Grado de Erodabilidad
Sedimentos Clásticos	Alto
Carbonatos Mesozoicos	Medio
Metamórficas	Bajo
Granitoides	Muy Bajo

Fuente: KUHNI y PFIFFNER (2001).

d) *Características misceláneas superficiales*: Como no existe información edafológica cartografiada para este sector montañoso, las formaciones superficiales del área fueron determinadas mediante la asociación entre tipos de depósitos sedimentarios y terrenos rocosos, descritos por el CIREN – CORFO en el *Estudio Agrológico de la VI Región* (1996), y las diferentes unidades geomorfológicas del paisaje representadas en la carta geomorfológica de CHAVEZ (2005). La clasificación de erodabilidad fue determinada a partir de autores como GOMEZ OREA (1994), DE PEDRAZA (1996), entre otros, según la granulometría y la permeabilidad.

Para las terrazas fluviales pleistocénicas y los conos aluviales, por donde se extiende el corredor de comercio Las Leñas, la información fue complementada a través de siete muestras tomadas en terreno, en un área que se consideró como representativa. Estas muestras fueron analizadas en dos etapas, que permitieron caracterizar los suelos. En primer lugar se realizó un análisis morfológico (horizontes, color, textura, estructura, fragmentos groseros, porosidad y permeabilidad). Luego se llevó a cabo un análisis granulométrico en laboratorio, utilizando el método del hidrómetro para la determinación de los porcentajes contenidos de arcilla, limo y arena, empleando como referencia el triángulo textural perteneciente al Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (United States Department Agriculture, U.S.D.A.).

### **2.1.3 Superposición y Ponderación de Variables.**

La identificación de los factores físico – naturales permitió desarrollar la superposición cartográfica de variables, incluyendo las ERefUs, mediante la extensión geoprocessing del software ARC VIEW 3.2. Las áreas resultantes corresponden a las Unidades de Respuesta a la Erosión (ERUs), las que fueron reclasificadas para determinar los diferentes niveles de susceptibilidad erosiva, representada a escala 1:150.000 a través del software ARCVIEW 3.2. La Tabla 8 muestra los parámetros utilizados por MÄRKER *et al.* (2001) en el río Mkomazi de Sudáfrica, para la generación de ERUs.

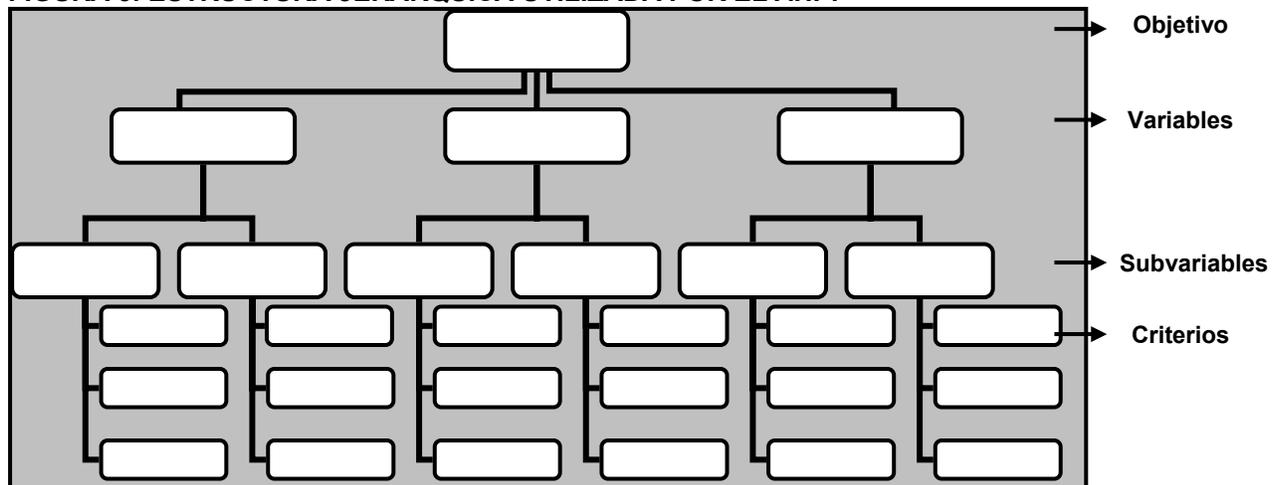
**TABLA 8: DETERMINACIÓN DE ERUs EN LA CUENCA DEL RIO MKOMAZI (SUDAFRICA).**

Clase ERU	EREFU	Exposición	Uso de Suelo	Morfología de las Laderas	Geología y Suelos
1	Sin erosión	Norte	No incorporado, pradera	Laderas convexas/cóncavas < 1° & > 60 m	Aluvial, arena, arcilla y arcilla mojada
2	Erosión de canales-precanales pequeños	Este	Arbusto, matorral y bosque	Laderas convexas 1°-5° & > 60 m	Partículas consolidadas y sedimentos
3	Erosión canalizada-precanalizada; cárcavas poco profundas	Sur	Humedales y cuerpos de agua	Laderas cóncavas 1°-5° & > 60 m	Basalto, arcilla y arcilla mojada
4	Erosión canalizada; cárcavas media-profundas	Oeste	Cultivos para subsistencia y comercio	Laderas convexas 5°-10° & > 30 m	Basalto, sedimentos esquistosos, arena
5	Erosión canalizada; cárcavas media-profundas y profundas	-	Urbano	Laderas cóncavas 5°-10° & > 30 m	Gneiss, dioritas arenisca y arcilla mojada
6	Erosión canalizada y cárcavas profundas; tierras malas; movimientos en masa	-	Degradado, no incorporado, césped y matorrales	Laderas cóncavas/convexas >10° & < 60 m	Granito, granodiorita arenisca, arena y arcilla

Fuente: MÄRKER *et al.* (2001).

Una etapa relevante en esta investigación, preliminar a la superposición cartográfica, es la organización del problema en un modelo estructurado. Esto se realizó mediante el *Proceso Analítico Jerárquico (Analytical Hierarchy Process, AHP)*, que según SAATY *et al.* (1991), es un procedimiento sistemático utilizado para representar jerárquicamente un problema, dividiéndolo en sus partes más pequeñas. Es una forma racional, eficiente y gráfica de organizar sistemas, expresando claramente el objetivo que se persigue, como también las variables y los criterios de decisión considerados (FIG.5).

**FIGURA 5: ESTRUCTURA JERARQUICA UTILIZADA POR EL AHP.**



Fuente: SAATY *et al.* (1991).

Una vez construido el modelo jerárquico es necesario ponderar los elementos que lo componen, determinando la importancia relativa que cada uno posee sobre el valor total de la problemática. Esto se obtiene a través de la comparación de importancias entre pares de elementos del mismo nivel jerárquico. La priorización se reduce a la *Matriz de Comparación por Pares de Elementos* (Tabla 9).

**TABLA 9: MATRIZ DE COMPARACION POR PARES.**

	Elemento 1	Elemento 2	Elemento 3
Elemento 1	E1/E1	E1/E2	E1/E3
Elemento 2	E2/E1	E2/E2	E2/E3
Elemento 3	E3/E1	E3/E2	E3/E3

Fuente: SAATY *et al.* (1991).

El peso es asignado según la *Escala de Importancia Relativa* de SAATY *et al.* (1991), el cual emplea criterios cuantitativos y cualitativos, pues se atribuyen valores numéricos a los juicios subjetivos respecto a la importancia de cada elemento (Tabla 10).

**TABLA 10: ESCALA DE IMPORTANCIA RELATIVA (NUMÉRICA Y VERBAL).**

Importancia Relativa (Escala Numérica)	Definición (escala verbal)	Explicación
1	Ambos Elementos tienen igual importancia.	Ambos elementos contribuyen igualmente sobre la problemática.
3	Moderada importancia de un elemento sobre otro.	Un elemento es ligeramente más importante sobre la problemática.
5	Fuerte importancia de un elemento sobre otro.	Un elemento es fuertemente más importante sobre la problemática.
7	Muy fuerte importancia de un elemento sobre otro.	Un elemento es muy fuertemente más importante sobre la problemática.
9	Extrema importancia de un elemento sobre otro.	Un elemento es absolutamente más importante sobre la problemática.
2, 4, 6, 8	Valores intermedios entre dos juicios adyacentes.	Valores de consenso entre dos juicios.
Recíprocos (1/2, 1/3, 1/4, 1/5, 1/6, 1/7, 1/8 y 1/9)	Si un elemento tiene un valor de la escala numérica (ejemplo: 3), el segundo elemento posee, entonces, un valor recíproco (es decir 1/3), cuando es comparado con el primero.	Un elemento es menos importante sobre la problemática. Ejemplo: Si el valor es de 1/3, un elemento es ligeramente menos importante sobre la problemática.

Fuente: SAATY *et al.* (1991).

Finalmente, para representar espacialmente los pesos que fueron obtenidos con apoyo del software Expert Choice, fue necesario multiplicar el valor de cada variable con el rango de erosividad o erodabilidad presente. Por ejemplo, si el grado de erodabilidad es alto para la geología, el valor total de susceptibilidad erosiva de aquella variable en una unidad espacial determinada, se obtiene a partir del siguiente cálculo:

$$\text{Peso Erodabilidad Geológica Alta} \times \text{Peso Variable Geología} = \text{Peso Total Variable Geología}$$

Para obtener el nivel de susceptibilidad erosiva global en cada unidad homogénea, se deben sumar todos los valores totales por variable.

## 2.2 PASOS METODOLÓGICOS

❖ **Primera Etapa:** Identificación de la erosión existente, Unidades de Referencia a la Erosión (ERefUs), en la sección de baja, media y alta montaña del área de estudio.

a) Análisis de NDVI (Normal Difference Vegetal Index) y de unidades geomorfológicas.

b) Clasificación de características erosivas presentes en el área de estudio, mediante la determinación de ERefUs.

c) Representación cartográfica de las ERefUs, mediante el software ARC VIEW 3.2, a escala 1:150.000.

❖ **Segunda Etapa:** Identificación de las variables físico – naturales que determinan la erosión en el valle de baja, media y alta montaña del valle del río Cachapoal.

a) Recolección de información *pluvial, topográfica, geológica* y de las *características misceláneas superficiales*, relevantes para el desarrollo de procesos erosivos en el área investigada, mediante revisión bibliográfica y cartográfica.

b) Asignación de rangos sectoriales de erosividad o erodabilidad, para cada una de las capas de información físico – natural.

c) Elaboración de las cartas temáticas de las variables físico – naturales, representadas mediante el software ARC VIEW 3.2., a escala 1:150.000.

❖ **Tercera Etapa:** Elaboración de unidades espaciales homogéneas con similar comportamiento erosivo, Unidades de Respuesta a la Erosión (ERUs), en la sección de baja, media y alta montaña en el valle del río Cachapoal.

a) Ponderación de las capas de información físico – natural, mediante la estimación de sus importancias sobre los procesos erosivos, a partir del análisis jerarquizado (*Proceso Analítico Jerárquico*), con apoyo del software EXPERT CHOICE.

b) Determinación de las ERUs mediante superposición de variables, con apoyo del software ARC VIEW 3.2. Posterior representación cartográfica a escala 1:150.000.

❖ **Cuarta Etapa:** Determinación de la susceptibilidad erosiva para el área de estudio, a partir de las Unidades de Respuesta a la Erosión (ERUs).

a) Reclasificación de ERUs mediante nueva escala de cualidades y construcción de la *Carta de Susceptibilidad Erosiva* a escala 1:150.000.

❖ **Quinta Etapa:** Discusión y conclusión de resultados obtenidos.

## 2.3 MATERIALES Y TERRENOS

❖ **Imagen Satelital:** Bandas roja (03) e infrarroja (04) de la imagen satelital LANDSAT 7 Enhanced Thematic Mapper (ETM); IDE 035-215, WRS:P/R 2:23/084, ACQ. Date 1999 - 12 - 26, Data Set ETM +, Producer Earth Sat, Attr. Ortho NV, Type Geo TIFF and Location Argentina – Chile.

❖ **Fotografías Aéreas:** Vuelo GEOTEC, escala 1:50.000, El Palomo, SAF 1997; línea de vuelo 02, N° 4788 y N° 4787; línea de vuelo 03, N° 3351, N° 3350, N° 3349 y N° 3348; línea de vuelo 04, N° 4720, N° 4721, N° 4722, N° 4723 y N° 4724; y línea de vuelo 05, N° 4653, N° 4654 y N° 4655.

❖ **Cartografía Base:** Cartas Topográficas pertenecientes al Instituto Geográfico Militar (IGM), escala 1:50.000; Rancagua (3400 – 7030), Laguna Cauquenes (3415 – 7030), Sewell (3400 – 7015) y Río Cortaderal (3415 – 7015).

❖ **Cartas Temáticas Base:** Mapa Santiago, escala 1:500.000, del Balance Hídrico de Chile (MOP – DGA, 1987); Carta Geológica de Chile, Hoja Teniente 1:250.000 de CHARRIER, (1983) y Mapa Geológico de la Cordillera de los Andes de Chile Central de KLOHN (1960).

### ❖ **Softwares:**

a) Programa ARC VIEW 3.2. para elaboración de cartas y superposición de variables. Con respecto a la exposición y la pendiente, se elaboró el DEM (Modelo Digital de Elevación) en formato GRID (celdas de 25 x 25 metros), mediante método TIN (Triangulated Irregular Network).

b) Software IDRISI 32 utilizado en la elaboración del índice NDVI (Normal Difference Vegetal Index).

c) Programa ARC INFO 3.2 para la digitalización de isoyetas de precipitación media anual del Balance Hídrico de Chile (MOP – DGA, 1987).

d) Software EXPERT CHOICE de apoyo al Proceso Analítico Jerárquico (AHP), en la ponderación de variables.

e) Sistema operativo WINDOWS XP para la construcción del documento, mediante el procesador de texto MICROSOFT WORD y la planilla de cálculo MICROSOFT EXCEL.

❖ **Trabajo de Terreno:** Tuvo dos etapas. La primera, entre el 6 y 8 de enero del 2004, de carácter exploratorio. En la segunda visita, entre el 6 y 9 de mayo del mismo año, se tomaron muestras de suelo en siete puntos, entre el río Cortaderal y la quebrada Las Arpas, que es un área representativa del paisaje en fondo de valle, por la presencia de todas las unidades geomorfológicas que se encuentran a lo largo río Cachapoal. El total y la localización de los puntos de muestra estuvo determinado por la accesibilidad.

## **CAPITULO 3. ESTADO DEL ASUNTO**

### **3.1 DINÁMICA DE LA EROSIÓN**

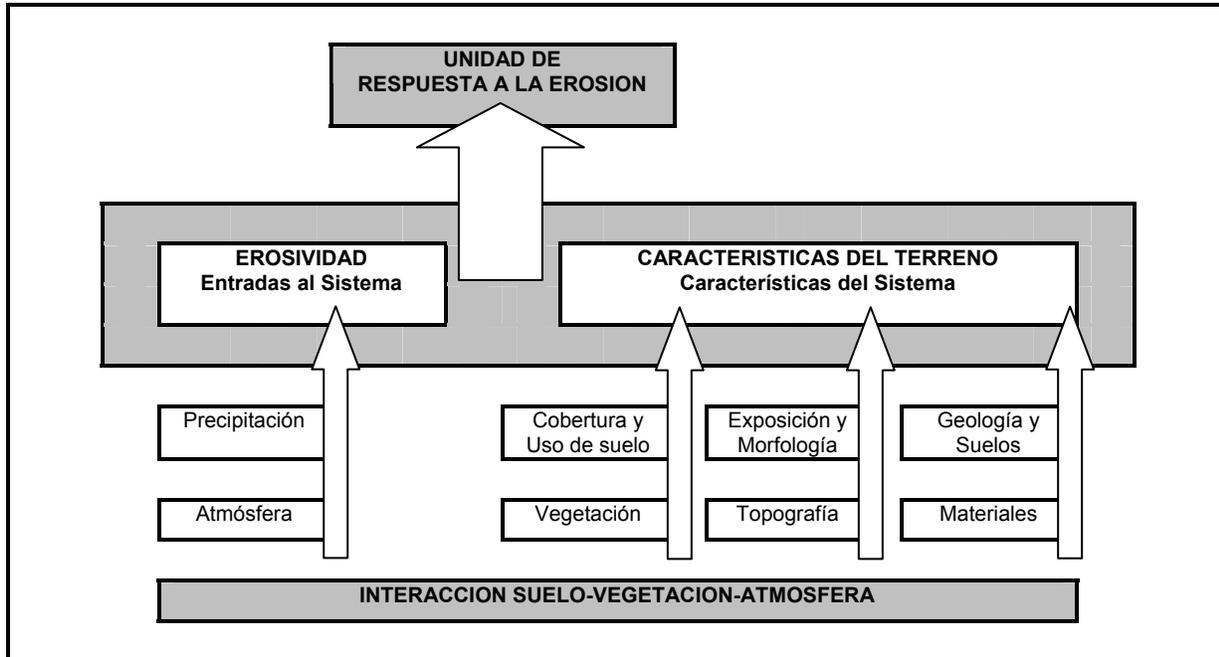
La perspectiva conceptual y teórica de las ciencias geofísicas sigue basándose en la actualidad en planteamientos evolutivos y del modelado (DE PEDRAZA, 1996). En este sentido, el medioambiente es considerado complejo pues los factores que lo componen no se comportan como entidades estáticas, ya que interactúan entre sí en una variedad de maneras. El concepto de medioambiente como un sistema, supone la entrada, el movimiento y la salida de materia, el cual busca alcanzar algún tipo o estado de equilibrio (GOUDIE, 1989). Los procesos del modelado superficial se constituyen como un sistema natural, pues responden al principio de intercambio de energía y materia entre las diferentes formas del relieve, lo cual es controlado por la interacción entre los elementos del medio físico. Así, para TRICART *et al.* (1982), *“El medio natural se caracteriza por unos flujos, tanto de energía como de materia, que son los que se manifiestan en los diferentes fenómenos que observamos”*.

Dentro de este contexto sistémico se impone la perspectiva morfodinámica, vale decir el conjunto de procesos interdependientes entre sí, que aseguran el flujo de materia y el consumo de energía entre los componentes. Es así, que el sistema morfogenético tiene límites definidos y una estructura donde los elementos se relacionan y conectan, lo que se ve reflejado sobre el paisaje.

Los procesos de transporte como el escurrimiento, los movimientos en masa, son parte fundamental del sistema morfogenético, sin embargo, no pueden asumir cualquier materia, pues su energía sólo produce un trabajo si se ejerce sobre materiales que puedan ser movilizados. En determinadas condiciones, un fluido sólo puede desplazar partículas con cierta dimensión. Generalmente, son masas superiores a la competencia de los agentes de transporte, por esta razón, para movilizar un material es necesario un acto preliminar de reducción como preparación del material (TRICART *et al.*, 1982).

Según MÄRKER *et al.* (2001), la *Interacción Suelo-Vegetación-Atmósfera*, actúa como un ecosistema con características que controlan su comportamiento. Este ecosistema al ser estimulado (entradas al sistema) responde de una manera específica (salidas del sistema). La sensibilidad, depende de los componentes (factores), pues la dinámica de los diferentes procesos de erosión se relaciona con ciertas asociaciones entre ellos. Los factores de este intercambio se pueden dividir entre aquellos que entran al sistema, fundamentalmente precipitación (erosividad), y los que son característicos del sistema (características del terreno). Las áreas que desarrollan los mismos procesos erosivos (con las mismas respuestas), tienen asociaciones similares entre entradas (atmósfera) y características del sistema (vegetación, topografía y materiales), las que han sido denominadas por este autor como Unidades de Respuesta a la Erosión (FIG.6).

**FIGURA 6: INTERACCION SUELO-VEGETACIÓN-ATMÓSFERA.**



Fuente: MÄRKER *et al.* (2001).

Algunos autores como ZARUBA & MENCL (1982) en JAQUE (1995) reconocen una relación entre movimientos de laderas y precipitación, intercambio que es aceptado como causante de deslizamientos y cuya magnitud estaría determinada por condiciones climáticas, topográficas, geológicas, edafológicas, etc. FLAGEOLLET (1989) en JAQUE (1995), agrupa los factores que intervienen en los procesos que se producen en las laderas, de acuerdo a los derrumbes y los deslizamientos (Tabla 11).

**TABLA 11: FACTORES QUE INTERVIENEN EN LOS MOVIMIENTOS DE TERRENO.**

Factor	Derrumbe	Deslizamiento
Supresión del Soporte Natural		X
Supresión del Soporte Artificial	X	
Presión de Aguas sobre las Paredes y Grietas	X	
Hielo Intenso y Prolongado	X	
Vibración (Sismo)		X
Lluvia (Saturación)		X
Lluvia Excepcional	X	X
Crecida Rápida de Ríos		
Infiltración Accidental o Provocada		X
Infiltración Natural o Artificial		X
Vaciado Rápido de un Lago de Retención	X	X

Fuente: FLAGEOLLET (1989).

Según la Tabla 11, los procesos de derrumbes se ven influenciados por la supresión del soporte artificial y la presión del agua sobre paredes y grietas, erosionando el talud por la base, facilitando así el desprendimiento del material. En cuanto a los procesos de deslizamiento, los factores corresponden a supresión del soporte natural, como la deforestación de laderas inestables, que quedan directamente expuestas a la acción de agentes como las precipitaciones que activan los procesos erosivos (JAQUE, 1995).

### 3.1.1 Erosividad

Según FERRANDO (1992), la *erosividad* se encuentra condicionada por los factores externos, y correspondería a la acción de un evento detonante (*T*) y al potencial de energía destructiva externa o energía de posición (*P*):

$$\text{Erosividad} = T \times P$$

La principal entrada en la interacción Suelo-Vegetación-Atmósfera es la precipitación y su correspondiente escurrimiento, lo cual provoca erosión específica y transporte de sedimentos como salida del sistema (MÄRKER *et al.*, 2001). La precipitación constituye un factor relevante en la generación de procesos de alteración de laderas y en los movimientos del terreno, pues activa procesos morfogenéticos (JAQUE, 1995). Más aún, la pérdida del suelo está relacionada con la lluvia, por el poder de desprendimiento del impacto de las gotas sobre la superficie (MORGAN, 1997).

CASTRO *et al.* (1995) realizó una clasificación según aquellos efectos detonantes de la remoción en masa, donde la precipitación es la que provoca la mayoría de las formas erosivas (Tabla 12).

**TABLA 12: EFECTOS DETONANTES DE LAS REMOCIONES EN MASA.**

Detonante	Formas Erosivas
Acción de la Precipitación	Erosión Laminar y Lineal, flujos de Barro y escombros Deslizamientos
Acción de la Gravedad	Desprendimientos

Fuente: CASTRO *et al.* (1995).

De acuerdo a QUINTANILLA (1995), el factor climático no solo incide en la generación de procesos naturales en ambientes montañosos, además potencia el desarrollo de ciertos tipos de vegetación. En este sentido, la precipitación por sí sola no provoca erosión, pues una buena distribución durante el año origina una capa de vegetación que proporciona estabilidad morfodinámica y evolución del suelo (VEIT, 1991).

### 3.1.2 Erodabilidad

Según FERRANDO (1992), la *erodabilidad* está condicionada por factores internos, y puede ser asociada al concepto de *vulnerabilidad degradacional*, correspondiente a la susceptibilidad presente en un paisaje a ser degradado (Z) y la resistencia natural a la degradación (S):

$$\text{Erodabilidad: } Z \times S$$

La erodabilidad superficial depende de la resistencia a la degradación, la disolución de los materiales y su posterior evacuación. Es decir está en función del estado de los materiales y su grado de cohesión. Además, existe una relación entre permeabilidad del terreno, espesor de los materiales (distancia entre superficie y sustrato), rugosidad del sustrato y cobertura vegetal (FERRANDO, 1992).

Con respecto a la relación entre *vegetación* y *erosión*, GOMEZ OREA (1994), plantea que la cobertura vegetal regula la escorrentía disminuyendo la energía cinética de la lluvia, reteniendo las partículas del suelo e incrementando el porcentaje de materia orgánica, dando mayor estabilidad, porosidad y permeabilidad. MORGAN (1997), resalta el rol de la vegetación como una capa protectora. Las hojas y los tallos absorben parte de la energía de la precipitación y del escurrimiento, paralelamente, los sistemas radiculares contribuyen a la resistencia mecánica del suelo.

Entre las características del relieve importantes para el desarrollo de procesos erosivos se encuentran *la exposición* y *la pendiente*. Según JAQUE (1995), la *exposición a la humedad*, barlovento y sotavento, incide directamente en la alteración de laderas, provocando saturación del material en vertientes con alta pluviosidad (barlovento), permitiendo el mayor desarrollo de movimientos en masa, en comparación a laderas ubicadas en sotavento (en sombra pluviométrica). Paralelamente, la *pendiente* es el motor de los procesos exógenos de movilización de masas, por acción de la fuerza de gravedad con presencia o no de agua (FERRANDO, 1996). Al aumentar la pendiente, la erosión se acrecenta al incrementarse la velocidad y el volumen de la escorrentía, favoreciendo el desplazamiento de las partículas del suelo hacia sectores más bajos, lo que se traduce en una pérdida neta en las partes más altas (MORGAN, 1997).

GOMEZ OREA (1994) señala que el medio geológico sufre una serie de procesos naturales como son los procesos de erosión. GONZALES *et al.*, (1995), reafirma el rol de la litología ya que algunas rocas favorecen la presencia de ciertas geoformas y son desfavorables a otras. Las rocas duras son menos degradables, mientras las rocas blandas son más fáciles de erosionar. Así, los limos se erosionan en mayor grado que las arenas, por la permeabilidad, y las arcillas gracias a sus cargas electromagnéticas.

Para BUTTERWORTH *et al.* (2000), las propiedades físicas del suelo varían a través de una serie de parámetros geomorfológicos. Por consiguiente, las formas del paisaje controlan la erosión pues ciertas unidades geomorfológicas se asocian a determinados tipos de suelo. GOMEZ OREA (1994), afirma que la erosión disminuye con la madurez del suelo y el contenido de materia orgánica. La evolución de los suelos, pedogénesis, dificulta a la degradación.

### **3.2 GEODINÁMICA EN AMBIENTES DE MONTAÑA**

De acuerdo a ARNAEZ – VADILLO en GARCÍA – RUIZ (1990), los procesos erosivos operan con mayor rapidez e intensidad en áreas de montaña, en comparación con otras regiones del planeta, por lo cual este ambiente es considerado como un relieve de *alta energía*. En la montaña es posible encontrar amplias superficies de roca desnuda, que se exponen a la meteorización; la actividad tectónica puede ser importante al provocar inestabilidad de materiales; las pendientes son pronunciadas y la precipitación anual es elevada con respecto a relieves más bajos. Según CASTRO *et al.* (2003), la montaña favorece la generación y el aporte de sedimentos mediante movimientos en masa, que activados por precipitaciones intensas, la acción periglacial o la sismicidad, pueden generar eventos catastrófico definiendo un ambiente muy inestable.

Se pueden considerar diferentes secciones de montaña en función de las condiciones ambientales, como variaciones en la vegetación y la pendiente, que conjuntamente a las condiciones morfoestructurales y tectónicas, conforman territorios diferenciados en cuanto a las formas presentes, su condición dinámica actual y los niveles de riesgos naturales, que se expresan mediante el aporte de masa desde las vertientes al fondo de valle (CASTRO *et al.*, 2003).

Con respecto al límite entre *alta y media montaña* TROLL (1972 y 1973) en GARCÍA – RUIZ (1990), sugiere una distinción geoecológica, considerando conjuntamente el término de la acción del hielo como agente morfogenético y límite inferior de la alta montaña, como también la aparición del factor vegetacional como parte superior de los ambientes de media montaña. *“Sin embargo en las cordilleras de gran rango altitudinal y dominadas por la estructura, la distinción entre media y baja montaña, resulta un ejercicio complejo ya que los procesos de denudación asociados a los diferentes pisos, son controlados por tales factores y consecuentemente no existe una clara distinción entre ambos, siendo más bien un cambio gradacional”* (SOTO *et al.*, 2004).

Los ambientes de baja y media montaña están ajenos a la acción glacial y se extienden por debajo del *timberline* (límite superior del bosque). Además predominan procesos de meteorización y transporte de sedimentos principalmente a través de aguas corrientes. Los movimientos en masa y los diversos tipos de escorrentía se encargan de modelar las vertientes (ARNAEZ – VADILLO en GARCÍA – RUIZ, 1990).

### 3.2.1 Sistemas de Vertientes

Con respecto a las unidades del paisaje montañoso, HAMBLIN (1992) afirma que las vertientes son sistemas dinámicos abiertos donde los efectos combinados del desgaste, permiten el transporte de materiales pendiente abajo hacia los cursos de agua. Este autor destaca el rol significativo que juega el proceso de remoción en masa en el transporte de materiales, sin dejar de mencionar el papel que cumple la erosión en cárcavas, ya que ambos procesos influyen en el modelado de un valle, pues si el corte hacia abajo provocado por los flujos canalizados fuera el único proceso en operación, la forma resultante sería un cañón profundo y vertical. Así, cuando opera la erosión se refuerza el transporte pendiente abajo, causando el retroceso de las vertientes.

ARAYA – VERGARA (1985) considera a las vertientes como sistemas y no como vertientes individuales simples. En otras palabras, se refiere a una combinación de varios tipos de vertientes individuales que conforman el sistema o la gran vertiente, y a las formas depositacionales correlativas a éstas. *“De la clasificación estructural de los sistemas de vertientes queda implícita la acción de la geodinámica externa frente a cada morfoestructura. Por esta razón, ella es resaltada más especialmente en cuanto a la tendencia erosiva de las vertientes de media montaña y de relieves bajos, en los cuales la estructura no es tan definitiva en la explicación de los fenómenos externos como en la alta montaña”*. Esto se debe principalmente a razones morfoclimáticas, pues en los ambientes de media montaña existe poca influencia del frío y las formaciones superficiales cubren de mejor manera las morfoestructuras.

Es posible representar de manera sintética la clasificación de vertientes propuesta por ARAYA – VERGARA (1985 y 1996), la que se muestra en la Tabla 13, donde se destaca la doble base de clasificación, *estructural* y *exógena*.

**TABLA 13: SISTEMAS DE VERTIENTES.**

<b>1. Influencias Estructurales</b>	<b>2. Influencias Exógenas</b>
<u>1.1 Estructura concordante</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Cara libre y talud</li> <li>• Cara libre rugosa y talud</li> <li>• Cara libre rugosa</li> <li>• Vertiente de Richter</li> <li>• Residual de plateau</li> </ul> <u>1.2 Estructura monoclinal</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Vertiente conforme</li> <li>• Vertiente inversa</li> <li>• Discordante indefinida</li> <li>• Hog – back</li> </ul>	<u>2.1 Según tendencia erosiva</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>• De flanco activo</li> <li>• De flanco pasivo</li> <li>• Residual</li> <li>• De excavación</li> </ul> <u>2.2 Según grado de desgaste de las divisorias</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Interfluvios ferales</li> <li>• Interfluvios suavizados</li> </ul>

Fuente: ARAYA – VERGARA (1991).

Al respecto ARAYA – VERGARA (1996), afirma que la máxima influencia estructural se da en el ambiente periglacial de altura (> 3.000 m.s.n.m.), en tanto que la máxima expresión del modelado exógeno es frecuente en el templado seco de baja montaña (< 1.400 m.s.n.m.); encontrándose entre ambos el ambiente templado seco de media montaña, intercalándose la influencia endógena y exógena (3.000 – 1.400 m.s.n.m.).

### 3.2.2 Formas Basales de Contacto

Con respecto a las formas derivadas de flujos de muy alta velocidad, es conocida la distinción morfológica entre conos de gravedad y de avalancha (SOTO y CASTRO, 2003c). BLIKRA *et al.* (1998), afirma que la dinámica de los depósitos modernos se caracteriza por el desarrollo de rápidos movimientos gravitacionales de detritos rocosos, de nieve o la mezcla de estos en ambientes de fuerte pendiente. Este autor realizó una comparación entre los depósitos basales de contacto (Tabla 14).

**TABLA 14: COMPARACIÓN ENTRE CONOS COLUVIALES Y ALUVIALES.**

Características Típicas	Conos Coluviales	Conos Aluviales
Ambiente Geomórfico	Laderas y base de laderas (abanico de ladera)	Piedmont y ancho de valle (abanico de plano)
Cuenca	Barranco de laderas	Cuencas y valles intermontanos
Máxima Localización	Parte superior de laderas (base de barrancos)	Base de laderas (Valles y cuencas)
Pendiente de los depósitos	Entre 35° y 45° en la cúspide, y entre 15° y 20° en la base	Ocasionalmente sobre los 10° y 15° en la cúspide, y comúnmente menos de entre 1° y 5° en la base.
Radio en la Horizontal	Menos de 0,5 km y ocasionalmente entre 1 y 1,5 km	Comúnmente 10 km y ocasionalmente sobre los 100 km
Sedimentos	Principalmente Gravas	Gravas y arenas
Tendencia Tamaño Granos	Escombros groseros en la zona baja/base	Escombros groseros en la zona superior
Procesos Depositionales	Avalanchas, Incluyendo caída de rocas (rockfall) flujo de escombros (debrisflow) y flujo de nieve (snowflow); menormente flujo de agua (waterflow) como cárcavas (gullies)	Flujo de escombros ( <i>debrisflow</i> ) y/o flujo de agua ( <i>waterflow</i> ), en este último caso en la forma de escurrimiento trenzado ( <i>braided streams</i> )

Fuente: BLIRKA *et al.* (1998).

Para este autor, el concepto de coluviamiento hace referencia a taludes y depósitos de materiales, principalmente detritos y escombros de laderas montañosas. Estos sistemas deposicionales, desarrollados a partir de una intensa actividad postglacial, toman las formas de conos cortos, profundos y coalescentes. SOTO y CASTRO (2003a), afirman que *“Los depósitos basales, conformados por frecuentes, extensos y potentes conos coluviales, constituyen las formas más representativas de la geodinámica externa actual y su importancia trasciende a la noción de un depósito de base, constituyendo formas muy dinámicas y variadas en términos de los agentes que actúan, de los procesos intervinientes y del área de difusión”*.

Entre las formas de contacto entre montaña y cuenca intermontana aparecen los *conos* y los *glacis*, correlativos a las formas de erosión presentes en montaña. Estas unidades deben ser enfocadas como manifestaciones de la dinámica desarrollada durante el Cuaternario, pero también como reguladores de la dinámica actual hacia el fondo del valle (ARAYA – VERGARA, 1985). En la media montaña el aporte de sedimentos al sistema fluvial se realiza a través de flujos de detritos, como también desde las cuencas tributarias y sus conos aluviales imbricados en el fondo del valle. Estos conos son acumuladores de materiales, evacuados por la acción del socavamiento lateral de los ríos (GARCIA – RUIZ *et al.*, 1990).

Según TRICART (1972) en ARAYA – VERGARA (1985), es necesario hacer una separación entre conos de deyección caóticos (torrenciales) y conos de deyección con mayor tamaño. Los primeros están asociados a las unidades de glacis, y pertenecen a cuencas relativamente pequeñas, que no poseen suelos desarrollados, los segundos estructuran el gran piedmont y están relacionados con cuencas de mayor superficie.

### **3.2.3 Formas Fluviales**

Según TRICART (1977) en ARAYA – VERGARA (1985), con respecto a la acción fluvial son relevantes *las formas polifásicas de terrazas*. Los lechos de erosión son tratados con la noción de balance de disección, que define la acción resultante entre la actividad de las vertientes y los talwegs. El balance es positivo si el río puede evacuar materiales del talweg y aún erosionar, y es negativo si el río no puede evacuar los sedimentos del talweg, acomodando su canal a este mayor abastecimiento. En relación a la dinámica fluvial BLIKRA *et al.* (1998), señala que el flujo en zonas periglaciales se caracteriza por su irregularidad y los prolongados períodos bajo cero grado, que interrumpen la actividad fluvial. No obstante, durante la primavera o comienzos del verano el flujo aumenta por un breve período, incrementando la erosión y el movimiento de detritos. Este patrón de actividad fluvial concentrada, tiene un mayor potencial de erosión y transporte que un flujo distribuido homogéneamente durante el año.

## **3.3. FORMAS DE EROSIÓN EN AMBIENTES DE MONTAÑA**

### **3.3.1 Remoción en Masa**

La remoción en masa corresponde al proceso gravitatorio de movilización lenta o rápida de un volumen de suelo, roca o ambos, en proporciones diversas, generado por una serie de factores. Pueden provocarse debido a rupturas o fallas, cuando es superada la resistencia al corte del material (desprendimientos, deslizamientos, flujos); o a menor velocidad, como simples deformaciones superficiales (reptación, soliflucción) vinculadas a mecanismos climáticos (HAUSER, 1993).

Para HAUSER (1993), los ambientes de morfología empinada, con rocas tectonizadas e importante disponibilidad de material fragmentario suelto, resultan muy favorables para los procesos de remoción en masa, los que una vez activados alcanzan enorme poder destructivo, en función del volumen y velocidad de deslizamiento.

En términos generales, es posible identificar tres formas de remoción en masa (FIG.7):

❖ *Desprendimientos*: Según FERRER (1987) en HAUSER (1993), corresponde a la caída de roca o suelo producto de la gravedad, desde una ladera con pendiente fuerte o desde acantilados rocosos. Las superficies de rotura corresponden a planos de estratificación, por esta razón la mayoría de los desprendimientos se asocian a pérdida de resistencia producto del agua o al congelamiento.

Aquellas caídas desde laderas con pendientes abruptas son denominadas por ARAYA – VERGARA (2001) con el término inglés *fall*. En este tipo de movimiento, los bloques descienden rápidamente a través del aire por caída libre, saltación o rodando (CRUDEN *et al.*, 1996). Las *caídas de rocas* son denominadas como *rockfall* (BLIRKA *et al.*, 1998). Paralelamente, los desprendimientos de uno o varios bloques de material, con respecto a un punto bajo el centro del cuerpo se llaman *topple* (CRUDEN *et al.*, 1996).

❖ *Deslizamientos*: FERRER (1987) en HAUSER (1993), definió este tipo de remoción en masa como el deslizamiento del suelo o rocas de acuerdo a superficies de rotura más o menos netas, al ser superada la resistencia al corte generando un movimiento del volumen en conjunto. Algunos se caracterizan porque la superficie de rotura adopta una forma relativamente cóncava (rotacional), y otros que desarrollan superficies de rotura plana o ligeramente onduladas con poco movimiento rotacional (traslacional).

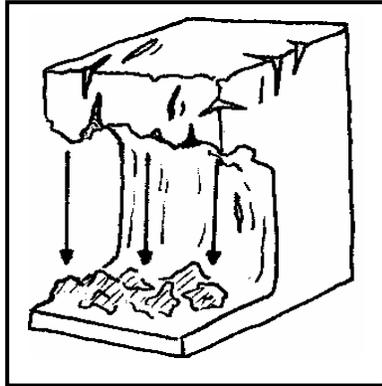
❖ *Flujos*: Según FERRER (1987) en HAUSER (1993), son movimientos propios de materiales sin cohesión, que tienen lugar en suelos susceptibles de experimentar una pérdida de resistencia, actuando los materiales involucrados temporalmente como un fluido y experimentando una deformación continua, sin presentar una rotura definida. Para CRUDEN *et al.* (1996), estos son movimientos continuos cuya distribución de velocidades es semejante a un fluido. Existe una gradación desde los deslizamientos a los flujos dependiendo del contenido de agua y la evolución del movimiento.

Los *Flujos de barro (mud flows)* son aquellos movimientos encausados en quebradas o talwegs, abriéndose pendiente abajo en la forma de conos de deyección. Esto ocurre en vertientes con materiales finos y sueltos que frente a lluvias intensas generan corrientes de barro (ARAYA-VERGARA, 2001). Aquellos sectores con morfologías empinadas, de rocas superficiales tectonizadas, materiales transportados, desprovistos de cobertura vegetal, en ambientes donde se producen lluvias intensas, son favorables para el desarrollo de flujos de barro. (HAUSER, 1993).

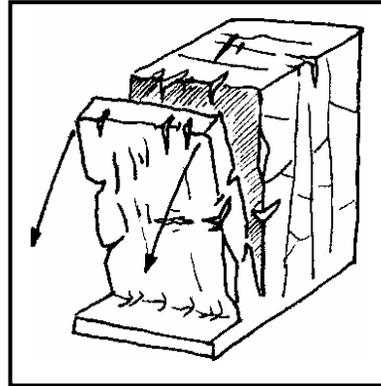
En los ambientes montañosos se producen flujos compuestos por detritos que, según ARAYA – VERGARA (2001), son movimientos originadas por material aportado desde vertientes abruptas, principalmente paredes rocosas, hacia los talwegs poco incididos, los que son puestos en movimiento por el escurrimiento, el cual forma una *corriente de detritos*. BLIRKA *et al.* (1998) los designa como *flow* o *flujo de escombros*.

**FIGURA 7: TIPOS DE REMOCION EN MASA.**

**Desprendimientos**

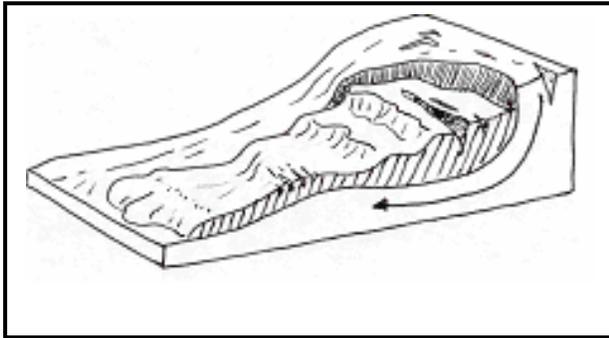


Caída

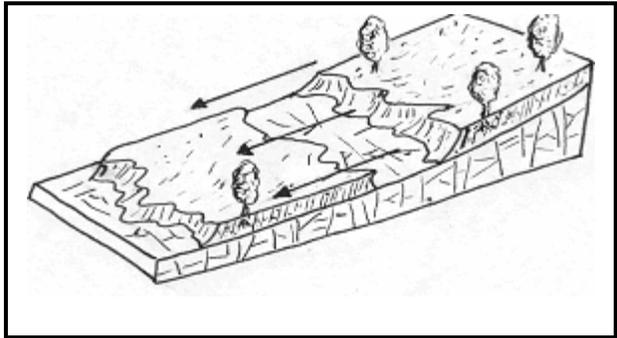


Topple

**Deslizamientos**

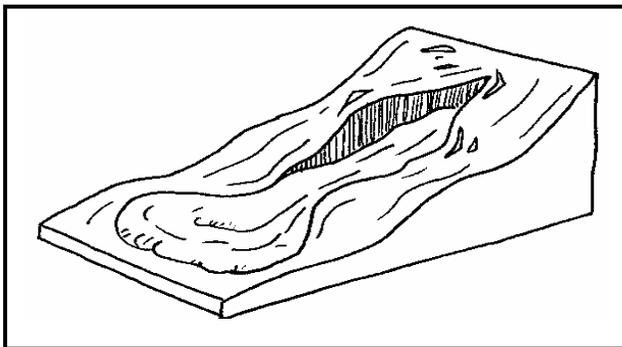


Deslizamiento rotacional

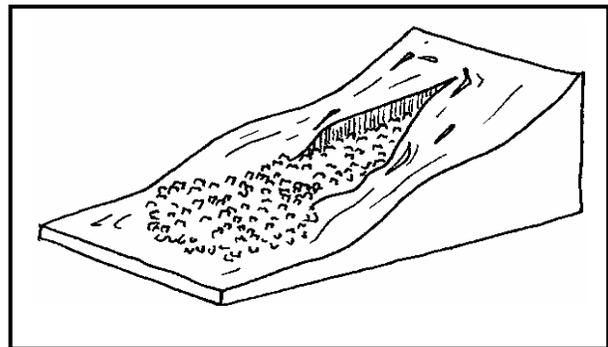


Deslizamiento traslacional

**Flujos**



Flujo de barro (mud flows)



Flujo de detritos (debris flows)

Fuente: Elaborado por el autor, a partir de HAUSER (1993).

En vertientes moderadamente escarpadas, se puede desarrollar el movimiento lento del manto superficial producto de la gravedad (*soil creep*). La reptación lenta es resultado de innumerables movimientos diminutos entre las partículas, que sólo es perceptible en períodos relativamente largos de tiempo (BLIRKA *et al.*, 1998). Un tipo de reptación lenta es la *solifluxión*, que es un movimiento vinculado a la acción de hielo-deshielo que afecta a suelos de grano fino, limo-arcillosos y de poco espesor (menos de un metro), en sectores con una gruesa cobertura de suelo o rocas intensamente alteradas, muy sensibles a incorporar agua (HAUSER, 1993).

### **3.3.2 Erosión Hídrica**

Este proceso se relaciona con el ciclo hidrológico de una cuenca, es decir la dirección del agua a través de la cubierta vegetal y su movimiento sobre la superficie (MORGAN, 1997). El agua es un importantes agente de desprendimiento, fundamentalmente como precipitación, pues al caer sobre terrenos sin vegetación desprende partículas que son arrastradas y depositadas en las tierras bajas (CONAMA, 1994). Este flujo superficial es conocido como *waterflow* (BLIRKA *et al.*, 1998). ARAYA – VERGARA (2001), denomina al escurrimiento sin una organización aparente como *sheet wash*.

Las principales formas de erosión hídrica en ambientes de montaña son:

❖ *Erosión por flujo precanalizado*: Cuando una tormenta supera la capacidad de almacenamiento en las depresiones superficiales, ya sea por una lluvia prolongada o porque la intensidad de la precipitación supera la capacidad de infiltración. Es raro que el flujo superficial se presente como una lámina uniforme, sino más bien corresponde a una masa trenzada de cursos de agua que no tiene canales marcados (MORGAN, 1997). Para ARAYA – VERGARA (2001), este flujo es la organización del escurrimiento en muchos hilos de agua, generando un escurrimiento trenzado (*rill wash*).

❖ *Erosión por flujo canalizado*: Al concentrarse aquellos flujos precanalizados sobre pequeñas depresiones, adquieren la energía suficiente para formar canalizaciones. A medida que se unen, incrementan su capacidad para desgastar cauces cada vez más profundos, que más tarde se transformarán en las cabeceras de las cárcavas (VERA, 1992). En vertientes abruptas, la escorrentía produce una actividad intensa formando surcos, caracterizada por innumerables acanaladuras.

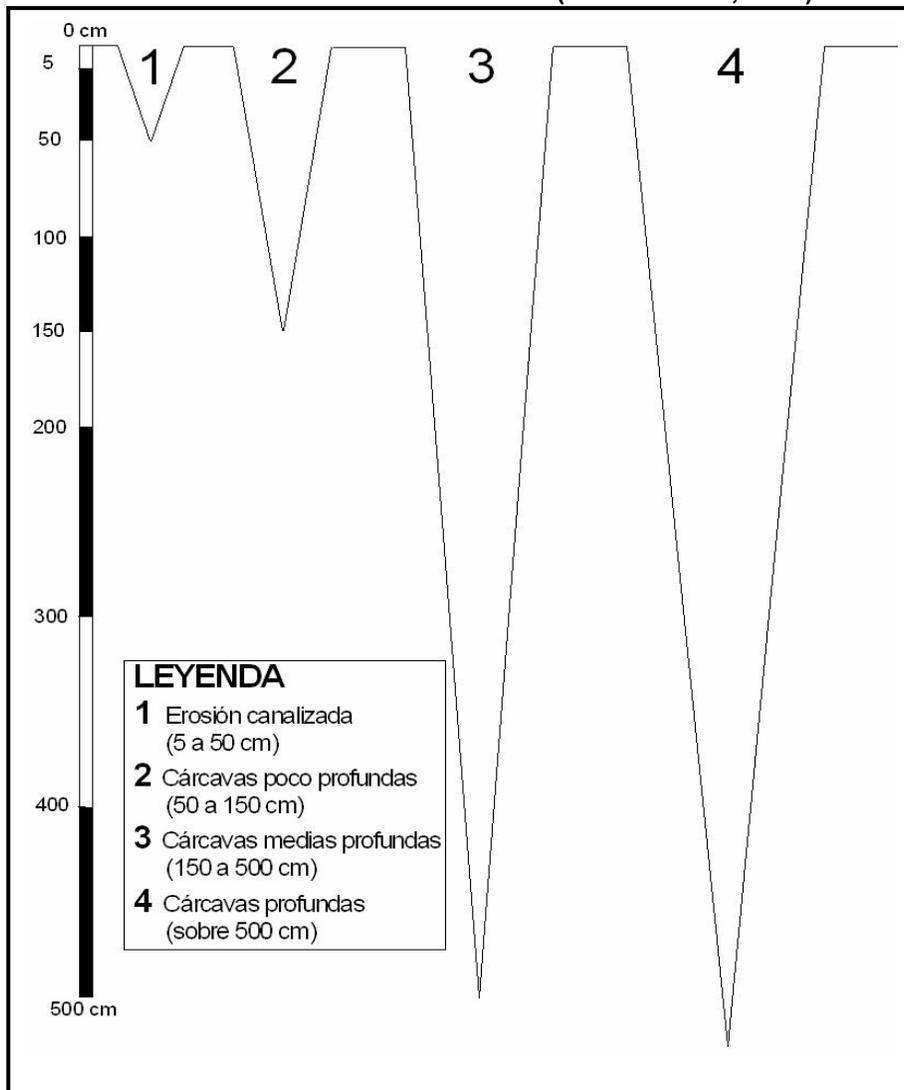
❖ *Erosión por cárcavas*: Son flujos de agua relativamente permanentes producidos durante las precipitaciones. Al ser comparadas con los cauces permanentes, que son relativamente llanos y cóncavos en su perfil, las cárcavas se caracterizan por tener cabeceras y saltos a lo largo de su curso. Además, poseen una mayor profundidad, menor anchura que los cauces estables y trasportan una mayor cantidad de sedimentos (MORGAN, 1997). Según la clasificación de intensidad de la erosión basada en la profundidad y la distancia entre canales y cárcavas de VAN ZUIDAN (1985), empleada por MÄRKER *et al.* (2001), estas últimas fueron clasificadas entre *profundas (deep gully)*, *medias profundas (medium deep gully)* y *poco profundas (shallow gully)*, como se observa en la Tabla 15 y FIG.8.

**TABLA 15: FRECUENCIA Y DENSIDAD DE LA EROSIÓN (VAN ZUIDAM, 1985).**

Profundidad (cm.) de Canales y Cárcavas (Tipo de erosión)	Espacio (m) entre canales y cárcavas				
	< 25	25-50	50-150	150-500	>500
5 – 50 (canalizada)	Moderado	Ligero	Ligero	Ligero	Ligero
50 – 150 (cárcavas poco profundas)	Severo	Moderado	Ligero	Ligero	Ligero
150 – 500 (cárcavas media profundas)	Severo	Severo	Moderado	Ligero	Ligero
> 500 (cárcavas profundas)	Severo	Severo	Severo	Moderado	Ligero

Fuente: MÄRKER *et al.* (2001).

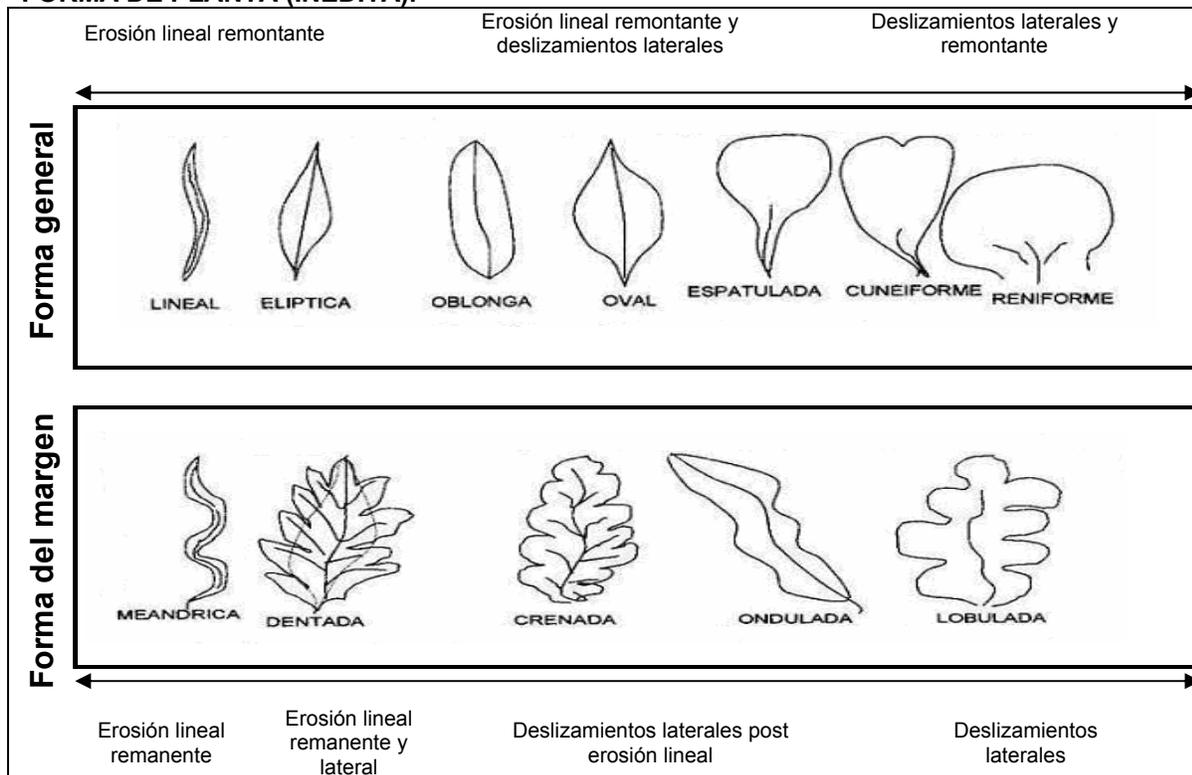
**FIGURA 8: REPRESENTACION ESQUEMATICA DE LA CLASIFICACION ENTRE CANALES Y CARCAVAS SEGÚN PROFUNDIDAD (VAN ZUIDAM, 1985).**



Fuente: MÄRKER *et al.* (2001).

Al respecto ARAYA-VERGARA (2001) elaboró una clasificación morfogénica, inédita, de cárcavas a partir de la forma general y la forma del margen. Las cárcavas lineales (lineal y elíptica) se caracterizan por remontar pendiente arriba, debido a la falta de material lateral que permita su desarrollo hacia los costados, por lo cual poseen bordes meándricos o dentados. Las cárcavas de tipo oblonga, oval y espatulada, generan deslizamientos laterales post erosión lineal, con márgenes crenados u ondulados. Aquellas cárcavas de forma general cuneiforme y reniforme, poseen bordes lobulados pues desarrollan erosión de carácter lateral (FIG.9).

**FIGURA 9: CLASIFICACIÓN MORFOGENÉTICA DE CÁRCAVAS DE EROSIÓN SEGÚN SU FORMA DE PLANTA (INÉDITA).**



Fuente: ARAYA – VERGARA (2001).

## **CAPITULO 4. RESULTADOS**

### **4.1. DEFINICION DE ERefUs PARA EL AREA DE ESTUDIO**

#### **4.1.1 Densidad Vegetal**

Los valores NDVI del área estudiada fluctúan entre  $-0,82$  y  $0,93$ , con una media y una desviación estándar de  $-0,1$  y  $0,16$  respectivamente, lo cual indica que la densidad vegetal es muy heterogénea, con sectores que tienen una gran cobertura y otros que poseen una escasa cobertura o suelo desnudo. Los valores cercanos a 1 se encuentran en el fondo del valle, entorno al lecho del río Cachapoal, lo que señala una mayor densidad, con respecto a sectores ubicados en laderas y cumbres de media y alta montaña que poseen índices bajo 0 (FIG.10).

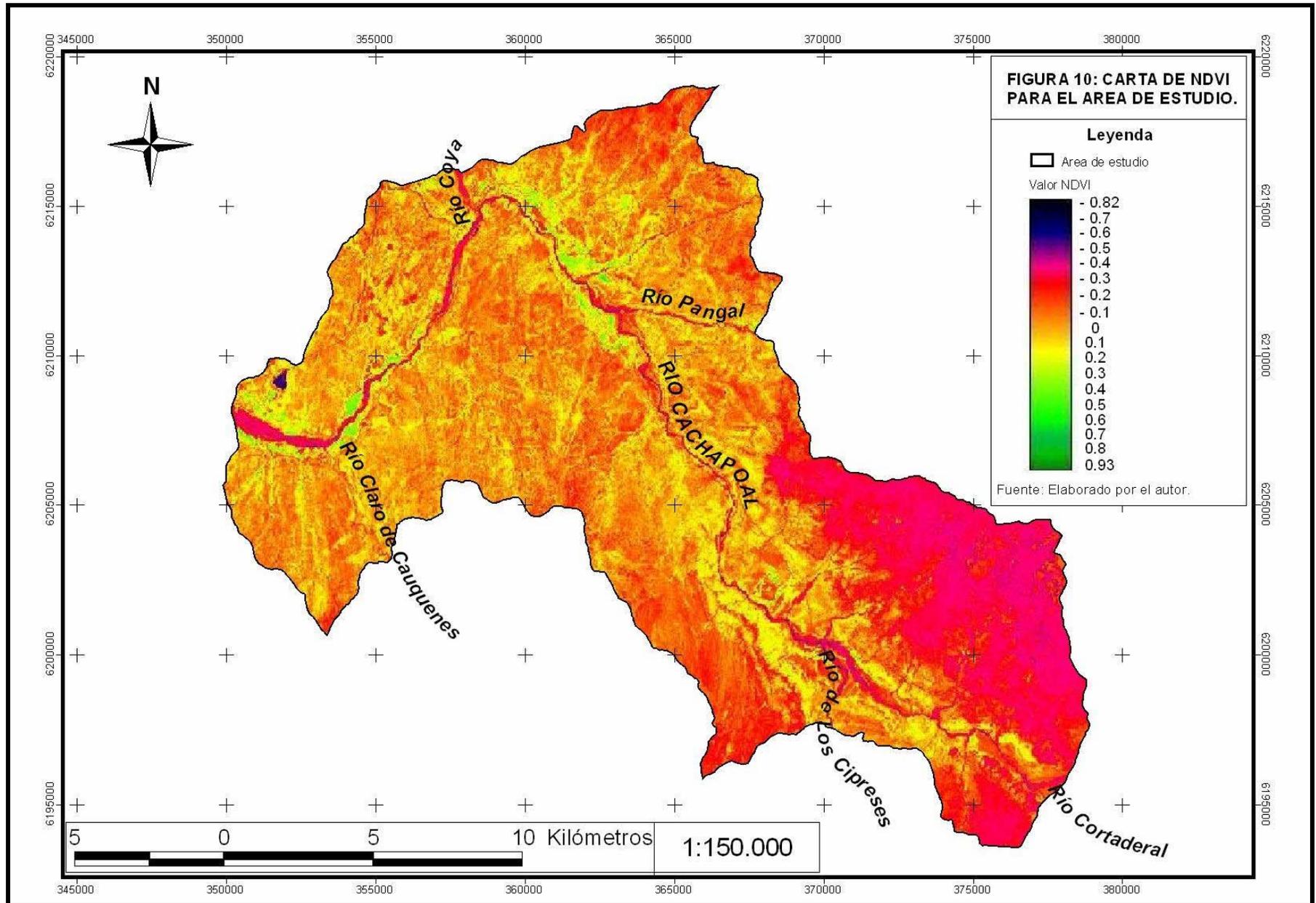
Al reclasificar los valores NDVI, basándose en los rangos de densidad vegetal de MÄRKER *et al.* (2001), fue posible agrupar aquellos sectores con similar cobertura en seis rangos, desde extremadamente bajo a extremadamente alto (Tabla 16 y FIG.11).

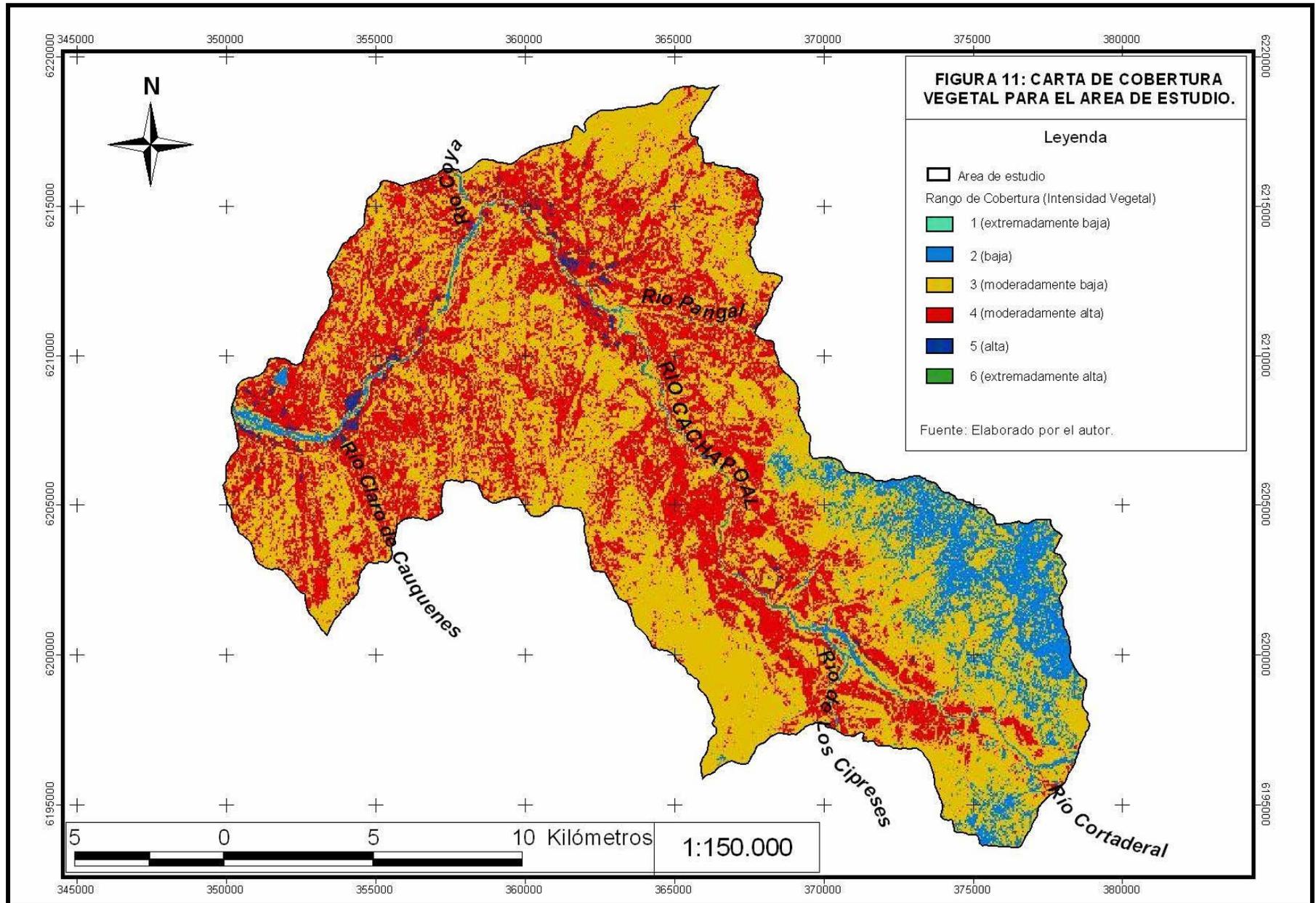
**TABLA 16: RANGOS DE COBERTURA VEGETAL PARA EL AREA DE ESTUDIO.**

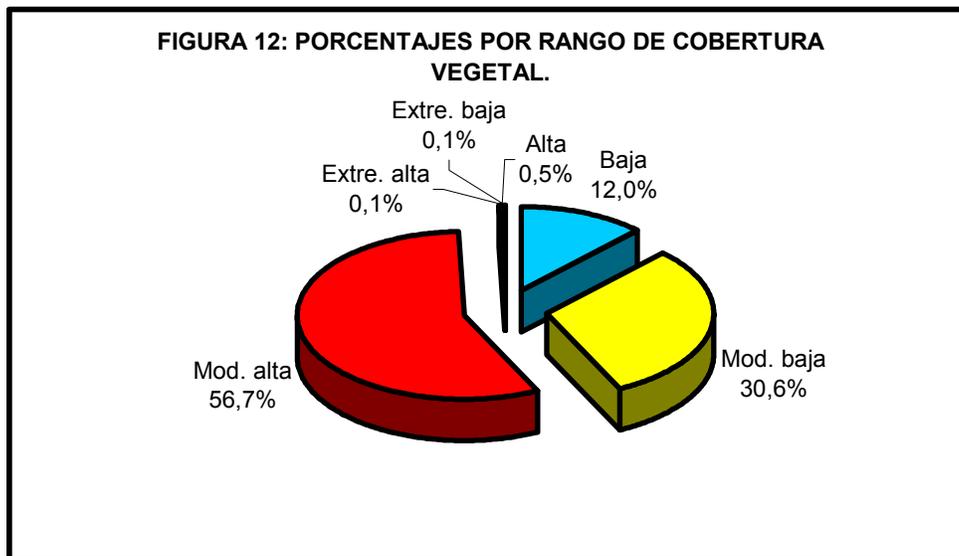
<b>Rango</b>	<b>Densidad Vegetal %</b>	<b>Intensidad Vegetal</b>	<b>Valores NDVI Reclasificados</b>
1	< 10%	Extremadamente baja	Entre -1 y -0,8
2	10% – 25%	Baja	Entre -0,8 y -0,5
3	26% – 50%	Moderadamente baja	Entre -0,5 y 0
4	51% – 75%	Moderadamente alta	Entre 0 y 0,5
5	76% – 90%	Alta	Entre 0,5 y 0,8
6	> 90%	Extremadamente alta	Entre 0,8 y 1

Fuente: Elaborado por el autor a partir de MÄRKER *et al.* (2001).

La reclasificación permitió distinguir que la mayor parte de la superficie (56,7%), posee una densidad vegetal moderadamente alta, entre 51% y 75%, correspondiente a matorral y bosque en sectores aterrizados, como también a vertientes de baja montaña (*rango 4*). Así mismo, la cobertura vegetal moderadamente baja, entre 26% y 50%, representa el 30,6 % (*rango 3*), correspondiente a estepa en media y alta montaña. Sin embargo, sólo el 12% de la superficie posee una baja cobertura vegetal, entre 10% y 25%, de tipo herbácea asociada a suelo desnudo entorno a la divisoria de aguas (*rango 2*). Los sectores con una densidad alta, entre 76% y 90%, se presentan de forma marginal con solo un 0,5 % en terrazas fluviales (*rango 5*), al igual que los rangos 1 y 6 que en conjunto corresponden al 0,2% (FIG.12).







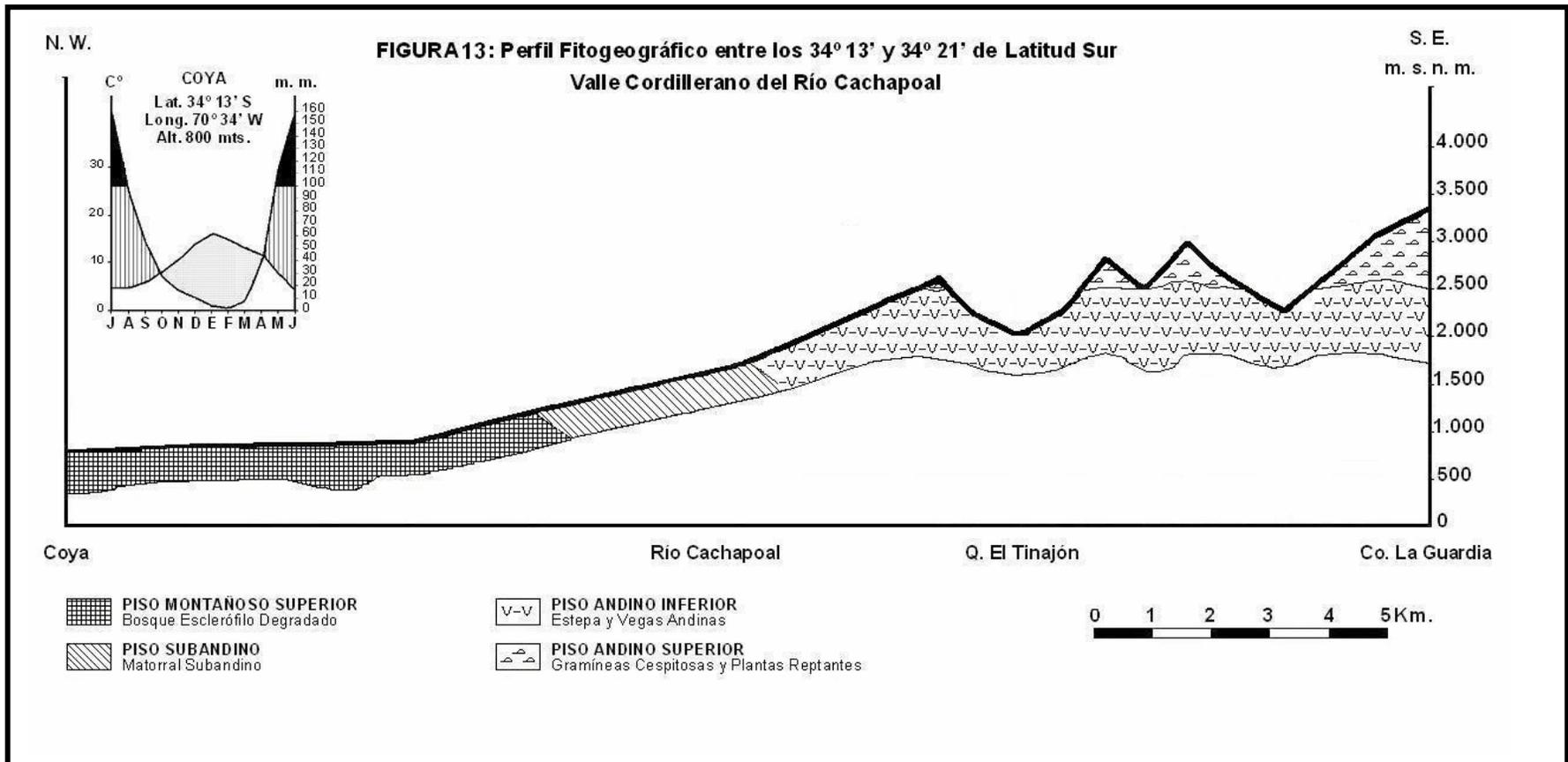
Fuente: Elaborado por el autor.

#### 4.1.2 Tipo de Vegetación

De acuerdo a QUINTANILLA (1983), la cuenca superior del río Cachapoal, pertenece a la *ecorregión del matorral esclerófilo laurifoliado cordillerano*, localizado en ambas cordilleras de Chile central. En el pueden distinguirse dos estratos. Uno que es arbóreo constituido por *Peumus boldus* (boldo), *Cryptocaria alba* (peumo), *Litrahea caustica* (litre), *Quillaja saponaria* (quillay), *Kageneckia oblonga* (bollén), siendo estos tres últimos árboles los más comunes a medida que se asciende en altura. En seguida, el estrato arbustivo que está compuesto por *Flourensia thurifera* (maravilla del cerro), *Retamilla ephedra* (retamilla), en otros.

En la cordillera de Los Andes la ecorregión está supeditada a condiciones ecológicas más rudas, constituida por cinco pisos fitogeográficos que son (FIG.13):

- Piso montañoso inferior: Matorral esclerófilo intervenido (500 a 700 m.s.n.m.).
- Piso montañoso superior: Bosque esclerófilo degradado (700 a 1.200 m.s.n.m.).
- Piso subandino: Matorral subandino (1.200 a 1.700 m.s.n.m.).
- Piso andino inferior: Estepa y vegas andinas (1.700 a 2.500 m.s.n.m.).
- Piso andino superior: Gramíneas y plantas reptantes (sobre los 2.500 m.s.n.m.).



Fuente: Elaborado por el autor, a partir de QUINTANILLA (1983).

#### **4.1.3 Posición Geomorfológica de la Vegetación**

Mediante fotointerpretación, análisis de la carta geomorfológica de CHAVEZ (2005) y observación en terreno, se identificaron ciertas características en la distribución de la densidad y los tipos de vegetación, en función de las unidades geomorfológicas.

En este sentido, la baja cobertura (*rango 2*) se ubica en el lecho del río Cachapoal compuesto por sedimentos inconsolidados. Así mismo, este rango fue identificado en *vertientes de cara libre rugosa y talud* de alta montaña, asociadas a conos aluviales, donde la superficie se encuentra desprovista de vegetación o es nula (estepa andina y plantas reptantes).

La densidad moderadamente baja (*rango 3*) se distribuye heterogéneamente en el área, principalmente en vertientes estructurales y formas deposicionales. Está presente en *vertientes de cara libre rugosa y talud* de alta montaña, en *vertientes residuales de plateau* y escasamente en *vertientes monoclinales* de baja montaña. También se ubica en *conos aluviales* de gran dinamismo y *terrazas fluviales* entorno a la desembocadura de algunos ríos. Estas son superficies con una densidad vegetal de matorral subandino y estepa andina, que ejerce un bajo control erosivo, favoreciendo la detritificación en las laderas y el flujo de detritos en los conos aluviales.

Las *vertientes* y las *formas deposicionales* con una cobertura vegetal moderadamente alta (*rango 4*), son unidades con un mayor control sobre los procesos degradacionales. Está presente en *vertientes de cara libre rugosa y talud* de media montaña, como también en *vertientes monoclinales* y *vertientes de flanco de valle pasivo* de influencia exógena, todas estabilizadas por el matorral subandino. Además, está en *terrazas fluviales* de baja y media montaña cubiertas por bosque esclerófilo.

En el área de estudio existen sectores con una densidad vegetal alta, que permite un gran control sobre los procesos erosivos (*rango 5*). Estos se localizan en baja montaña, entorno al río Cachapoal, exclusivamente en *terrazas fluviales* pleistocenas (*inundación, baja y media*), con una densa cobertura de bosque esclerófilo y sectores de cultivos.

Debido a la escasa presencia espacial que poseen los rangos extremadamente alto y extremadamente bajo, son imperceptibles dentro del área, representando sólo el 0,2%, por lo cual no tienen ninguna significancia en la erosión aquí presente.

La FIG.14, presenta una imagen panorámica del valle de media y alta montaña del río Cachapoal. En primer plano se observa el lecho fluvial entorno al cual se extienden las terrazas pleistocénicas de fondo de valle, las que están cubiertas por bosque esclerófilo con una densidad moderadamente alta. En la parte superior de la imagen destacan los sistemas de vertientes, donde crece matorral subandino y estepa andina.

**FIGURA 14: BOSQUE ESCLEROFILO, SECCIÓN DE MEDIA MONTAÑA.**



Fuente: Roberto Fernández.

#### 4.1.4 Determinación de ERefUs en el Area

Se determinaron y clasificaron seis clases de intensidad y tipos de erosión presentes en el área estudiada, en una adaptación de MÄRKER *et al.* (2001), a partir de la relación entre densidad vegetal, tipo de vegetación y posición geomorfológica de la biomasa. Así, las clases son las siguientes (Tabla 17):

**TABLA 17: UNIDADES DE REFERENCIA A LA EROSIÓN EN EL AREA DE ESTUDIO.**

Clase ERefUs	Intensidad de la Erosión	Tipo de Erosión	Densidad Vegetacional %	Tipo de Vegetación	Posición Geomorfológica
<b>1</b>	Baja	Erosión canalizada y precanalizada	76% < (Rango 5)	Bosque esclerófilo	Terrazas fluviales
<b>2</b>	Moderadamente baja	Erosión canalizada y cárcavas poco profundas	51% – 75% (Rango 4)	Bosque esclerófilo y matorral subandino	Vertientes de influencia estructural estabilizadas y terrazas fluviales
<b>3</b>	Moderadamente alta	Cárcavas medias y profundas	26% – 50% (Rango 3)	Matorral subandino	Terrazas fluviales
<b>4</b>	alta	Cárcavas profundas y flujos de detritos	26% – 50% (Rango 3)	Matorral subandino y estepa andina	Vertientes de influencia estructural y conos aluviales torrenciales
<b>5</b>	Muy alta	Desprendimientos de roca, aporte y flujos de detritos	< 25% (Rango 2)	Estepa andina, gramíneas y plantas reptantes	Vertientes de influencia estructural
<b>6</b>	Muy alta	Desprendimientos y deslizamientos en riberas fluviales	Nula	Ninguna	Lechos de río

Fuente: Adaptación de MÄRKER *et al.* (2001).

a) Clase 1: Corresponde a las terrazas fluviales pleistocénicas en baja montaña que tienen una cobertura vegetal alta (sobre 76%), constituida por bosque esclerófilo (piso montañoso superior) y sectores con cultivos agrícolas, que se asocian a una erosión de intensidad baja, representada por flujos hídricos precanalizados (profundidad bajo los 5 cm) y canalizados (profundidad entre 5 y 50 cm), con una frecuencia bajo los 50 metros.

b) Clase 2: Aquellos sectores con una densidad vegetal moderadamente alta (51% a 75%), están cubiertos principalmente por bosque esclerófilo y/o matorral subandino, los que facilitan la estabilización superficial y el control erosivo en vertientes de influencia estructural y terrazas fluviales pleistocénicas. Por esta razón, la intensidad de la erosión es moderadamente baja, a través de flujos canalizados (profundidad entre 5 y 50 cm) y por cárcavas de menor profundidad (entre 50 y 150 cm) de tipo lineal remontante, con una frecuencia de erosión entre 25 y 50 metros.

Esta clase de ERefUs, se observa en vertientes de cara libre rugosa de media montaña, en ambos flancos del valle donde la vegetación, compuesta por matorral subandino, ha estabilizado las laderas y los taludes, impidiendo el desprendimiento de rocas y flujo de detritos. Además, se asocia en baja montaña a vertientes conformes simples, las que poseen caras con poca rugosidad y disponibilidad de material para ser evacuado, como también en vertientes de flanco de valle pasivo, de aspecto regular y liso con pocas señales de erosión reciente. Se identificó en terrazas fluviales estabilizadas por bosque esclerófilo, en baja y media montaña.

c) Clase 3: En el fondo de valle las terrazas fluviales de origen pleistocénico cubiertas por matorral subandino (piso subandino), con una densidad vegetal entre 26% y 50%, están asociadas a erosión moderadamente alta, pues la cobertura vegetal no ejerce un control que es significativo. Esta situación permite el desarrollo de cárcavas profundas (sobre 500 cm) y semi profundas (entre 150 y 500 cm), correspondiente a erosión de tipo lineal remontante con deslizamientos laterales, cuya separación fluctúa entre 25 y 50 metros. La clase ERefUs 3 se localiza en la desembocadura de los ríos Cortaderal, de Los Cipreses y Pangal.

d) Clase 4: Paralelamente, hay sectores con una densidad vegetal entre el 26% y 50%, de matorral subandino y estepa andina, asociados a vertientes de influencia estructural. Esta clase posee una mayor intensidad erosiva que las terrazas fluviales con igual densidad vegetal, debido al aporte de materiales a través de taludes y conos aluviales.

Se observa en las vertientes de cara libre rugosa, en el flanco del valle sur de la alta montaña, donde las laderas aportan material mediante la caída de rocas (rockfall), formando los conos inconsolidados y activos (taludes), correlativos a estas vertientes. Además, corresponde a conos aluviales torrenciales donde se extienden coladas de detritos (*debrisflow*), provenientes de las quebradas de Peralitos, Retamal y El Tinajón. Está escasamente representado en vertientes inversas discordantes de baja montaña, con desprendimientos provocados por la incisión de estratos con diferentes durezas, y también en las vertientes suaves residuales (*plateau*) de las quebradas La Ternera y Agua Fría, correspondiente a superficies pedregosas de altura que desprenden material pendiente abajo y presentan incisiones profundas (sobre 500 cm).

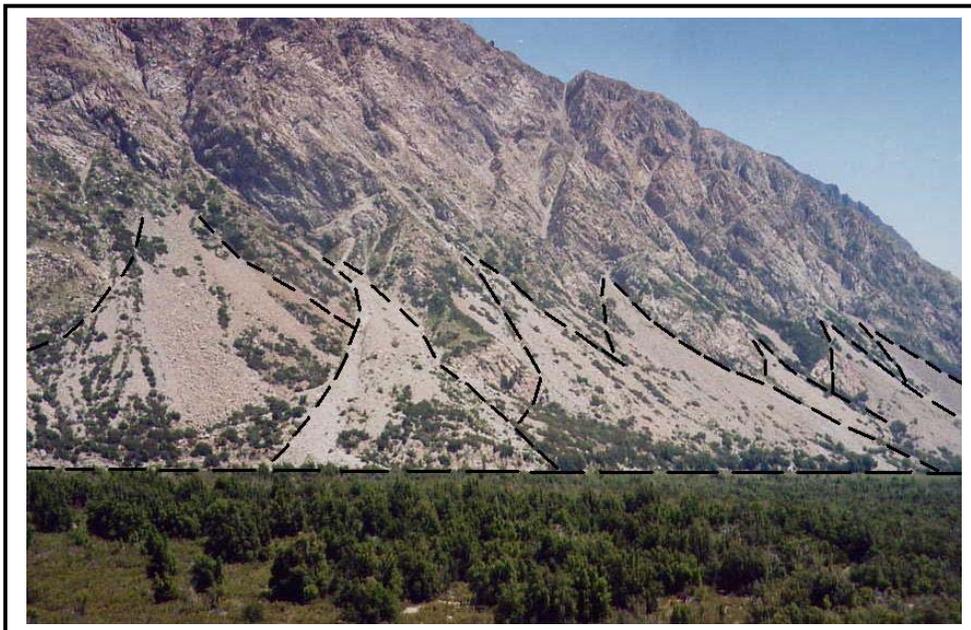
e) Clase 5: Aquellas vertientes de cara libre rugosa, con una erosión muy alta, son superficies rocosas que proporcionan material detrítico hacia el fondo de valle mediante la caída de rocas (rockfall) y los flujos de detritos (debrisflow). Se caracterizan por su baja cobertura vegetal (10% y 25%), compuesta por estepas, gramínea y plantas reptantes o simplemente suelo desnudo.

La clase ERefUs 5 se extiende en vertientes de cara libre rugosa y talud que conforman las cuencas tributarias de Peralitos, Retamal y El Tinajón, que evacúan material hacia el fondo de valle, por lo cual están asociadas a conos aluviales. Estas quebradas se activan principalmente en invierno producto del mayor monto de las precipitaciones, como también en primavera, por lo que tienen un marcado carácter estacional.

f) Clase 6: Corresponde al lecho fluvial del río Cachapoal, el cual posee erosión muy alta entorno a sus riberas, producto de deslizamientos y desprendimientos, durante las crecidas invernales (precipitaciones) y primaverales (deshielos). Estos procesos de remoción en masa, han generado escarpes abruptos en algunos tramos del valle, entorno a las terrazas fluviales.

En la imagen de la FIG.15, se destaca la baja condición estabilizadora de la vegetación en vertientes de cara libre en la sección de media y alta montaña, lo que ha favorecido la presencia de taludes, por caída y flujo de detritos (clase 5), que se han imbricado en la terraza fluvial pleistocénica con una cobertura moderadamente alta, que solo permite el desarrollo de erosión de tipo lineal (clase 2).

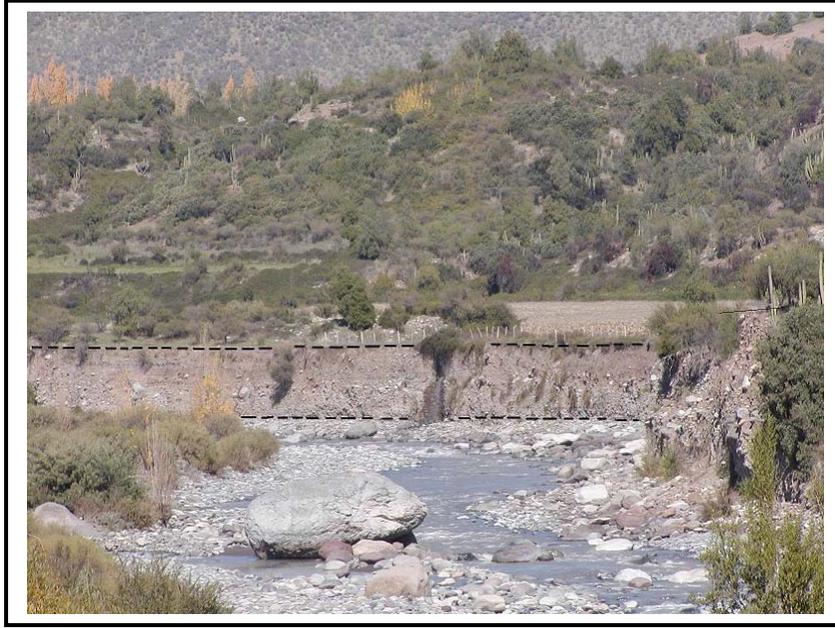
**FIGURA 15: TALUDES Y TERRAZA FLUVIAL BAJA, SECCIÓN DE ALTA MONTAÑA.**



Fuente: Gentileza de Geógrafo Carolina Chávez.

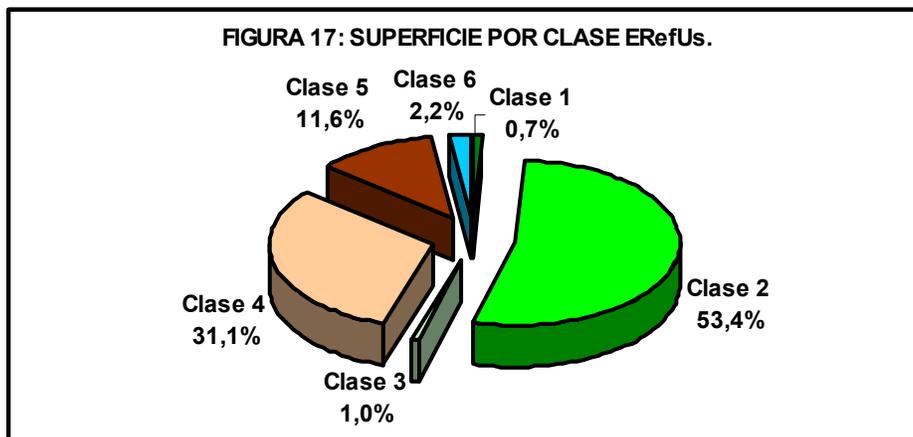
En algunos tramos del valle, la corriente del río Cachapoal ha erosionado la base de las terrazas fluviales, a partir de desprendimientos y deslizamientos (clase 6), generando paredes escarpadas entorno al lecho. La terraza de la imagen posee una densidad vegetal asociada a erosión por cárcavas, correspondientes a la clase 3 (FIG.16).

**FIGURA 16: TERRAZA FLUVIAL ESCARPADA POR EL LECHO, SECCIÓN DE MEDIA MONTAÑA.**

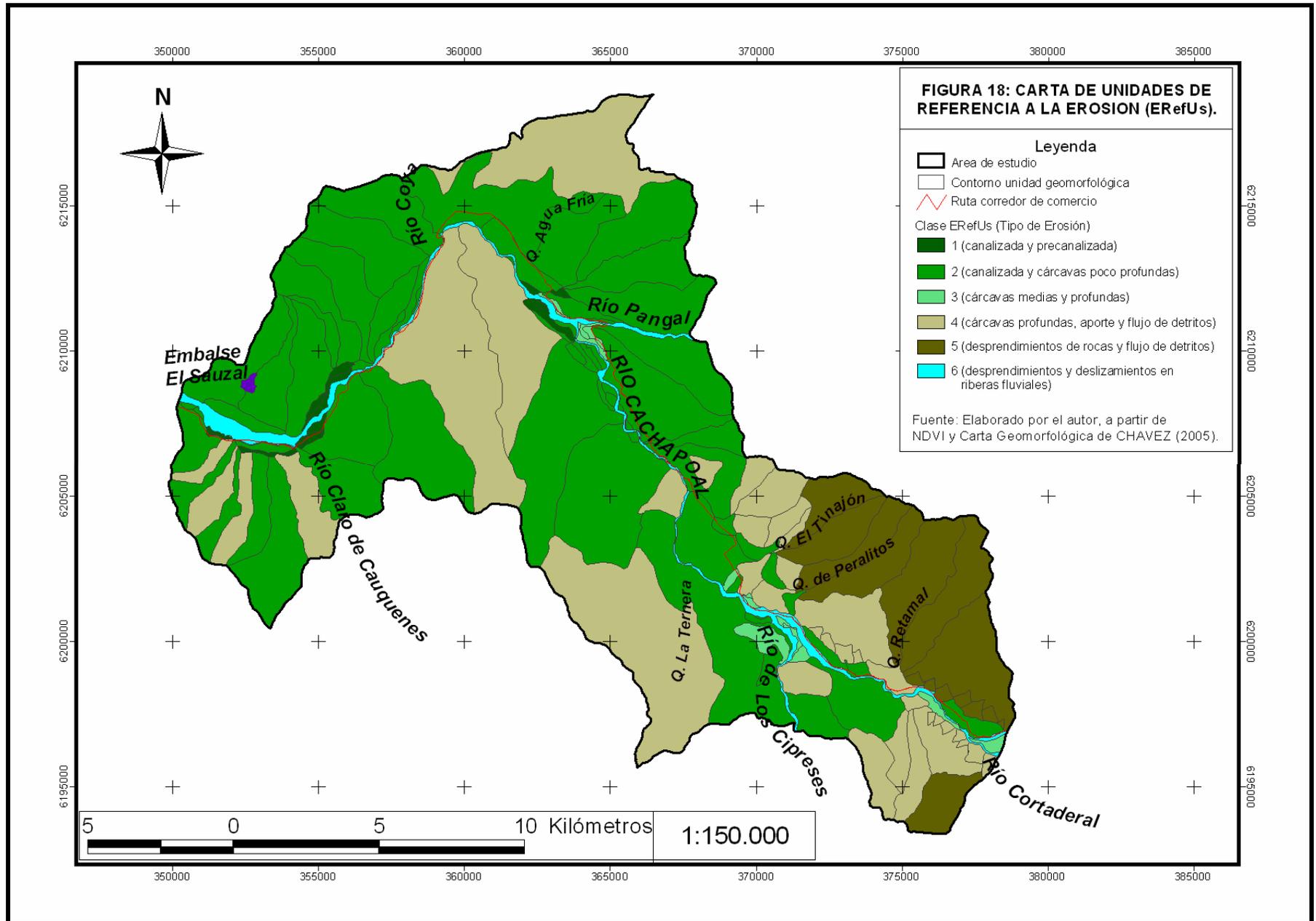


Fuente: Gentileza de Geógrafo Carolina Chávez.

De los 336,6 Km<sup>2</sup> totales, el 53,4% (179,7 Km<sup>2</sup>) corresponde a la clase ERefUs 2, por lo cual la mayor parte de la superficie posee intensidad erosiva moderadamente baja. Un tercio del área (104,8 Km<sup>2</sup>) posee erosión alta asociada a la clase ERefUs 4, y el 11,6% (29,7 Km<sup>2</sup>) corresponde a erosión muy alta clasificada como ERefUs 5. Por el contrario, el resto de las clases no poseen una distribución significativa, solo destacando la clase ERefUs 6, con un 2,2% (7,4 Km<sup>2</sup>) de intensidad erosiva muy alta entorno al lecho fluvial del río Cachapoal (FIG.17). La distribución por clases se observa en la FIG.18.



Fuente: Elaborado por el autor.



## 4.2 VARIABLES FISICO NATURALES

### 4.2.1 Características Pluviales

#### 4.2.1.1 Antecedentes pluviométricos generales

La precipitación es la característica climatológica que ejerce una mayor influencia en el desarrollo de procesos erosivos a nivel superficial y subsuperficial. En este sentido, las masas nubosas de Chile central se generan por la compleja relación entre los sistemas ciclónicos y anticiclónicos sobre el océano Pacífico, frente al territorio nacional. Estas masas de aire se desplazan hacia el este a través del mar, recargándose de humedad y volviéndose inestables sobre el continente. Estos desplazamientos se activan durante el invierno, cuando la alta presión del Pacífico (anticiclón) se mueve al norte, provocando el avance de frentes inestables asociados al núcleo de baja presión (IGM, 1985).

Según el *Balance Hídrico de Chile* (MOP – DGA, 1987), la precipitación media anual del área estudiada es de 600 mm al noroeste, aumentando gradualmente con la altura, llegando hasta los 1.700 mm en el límite sur. En términos generales, las isolíneas de precipitación media anual tienen una orientación W – E, con una desviación sureste debido a la relación entre lluvias y relieve, por lo cual los rangos de precipitación que van entre 1.000 mm y 1.700 mm se agrupan en torno a los sectores escarpados en la línea de altas cumbres sur, la que fluctúa entre 1.500 y 3.000 m.s.n.m. (FIG.19).

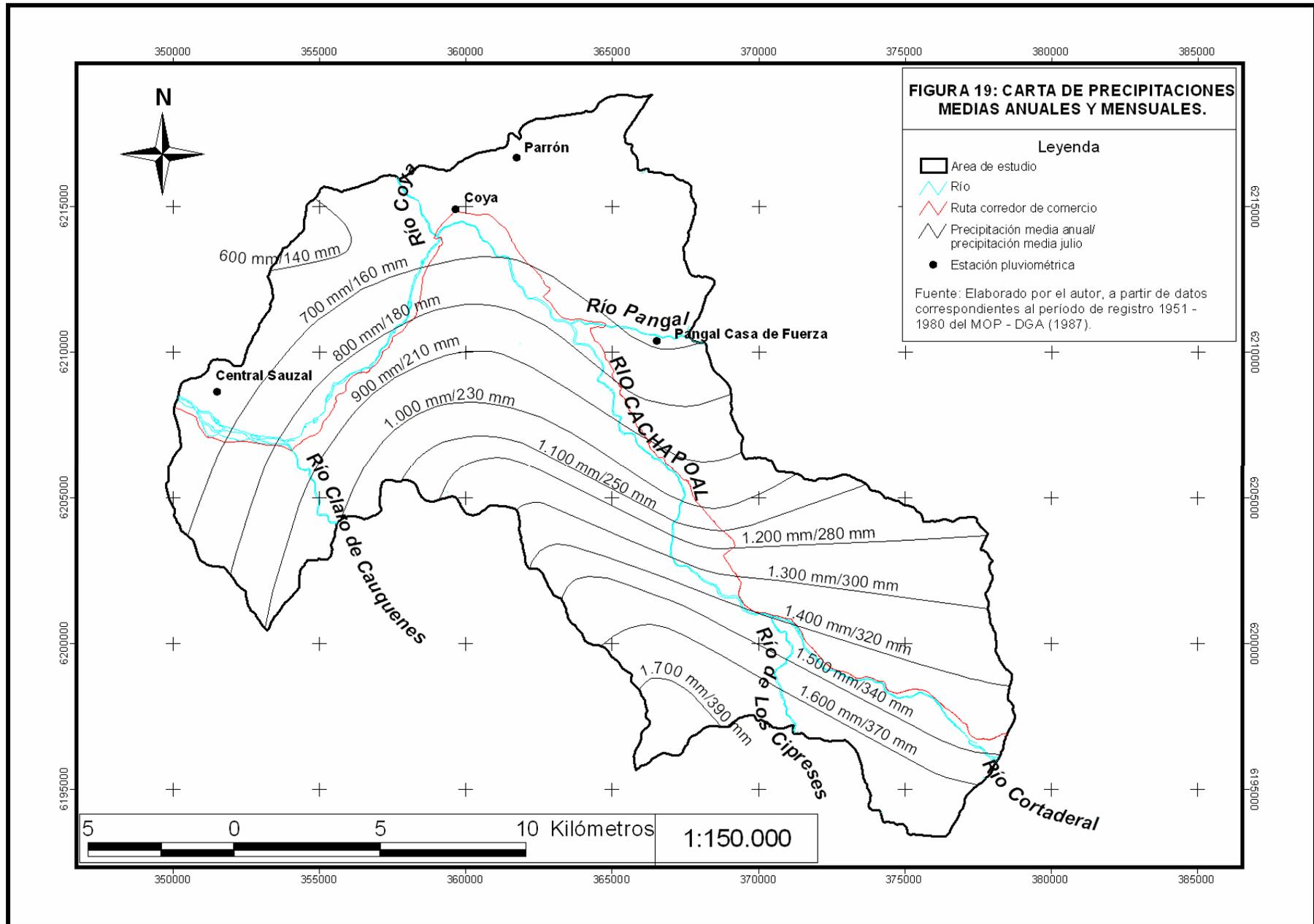
A partir de los datos de la estación pluviométrica Coya, los meses de enero, febrero y marzo acumulan 3 mm, 1 mm y 9 mm respectivamente, por lo que durante la estación estival la energía destructiva externa es irrelevante debido a los bajos montos. Por el contrario, en el mes de julio, durante el invierno, se produce la mayor concentración de precipitación a nivel mensual con 157 mm, correspondiente al 22,9% del total anual, generando un gran poder destructivo (MOP – DGA, 1983 y 1987). En este sentido, para la determinación del índice de erosividad de FOURNIER, este porcentaje fue calculado para cada isoyeta de precipitación media anual (Tabla 18 y FIG.19).

**TABLA 18: PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL Y MENSUAL PARA EL AREA DE ESTUDIO.**

Precipitación Media Anual (mm)	Precipitación Media Mensual julio (mm)
686*	157*
600	140
700	160
800	180
900	210
1000	230
1100	250
1200	280
1300	300
1400	320
1500	340
1600	370
1700	390

Fuente: Elaborado por el autor, a partir de los datos de precipitación correspondientes al período de registro 1951 – 1980 del MOP – DGA (1987).

\* Datos pertenecientes a la Estación Pluviométrica Coya.



#### 4.2.1.2 Erosividad pluvial en el área

A partir de los valores de precipitaciones medias, fue posible la determinación del índice de erosividad pluvial de FOURNIER (1960) para el valle del río Cachapoal (Tabla 19 y FIG.20).

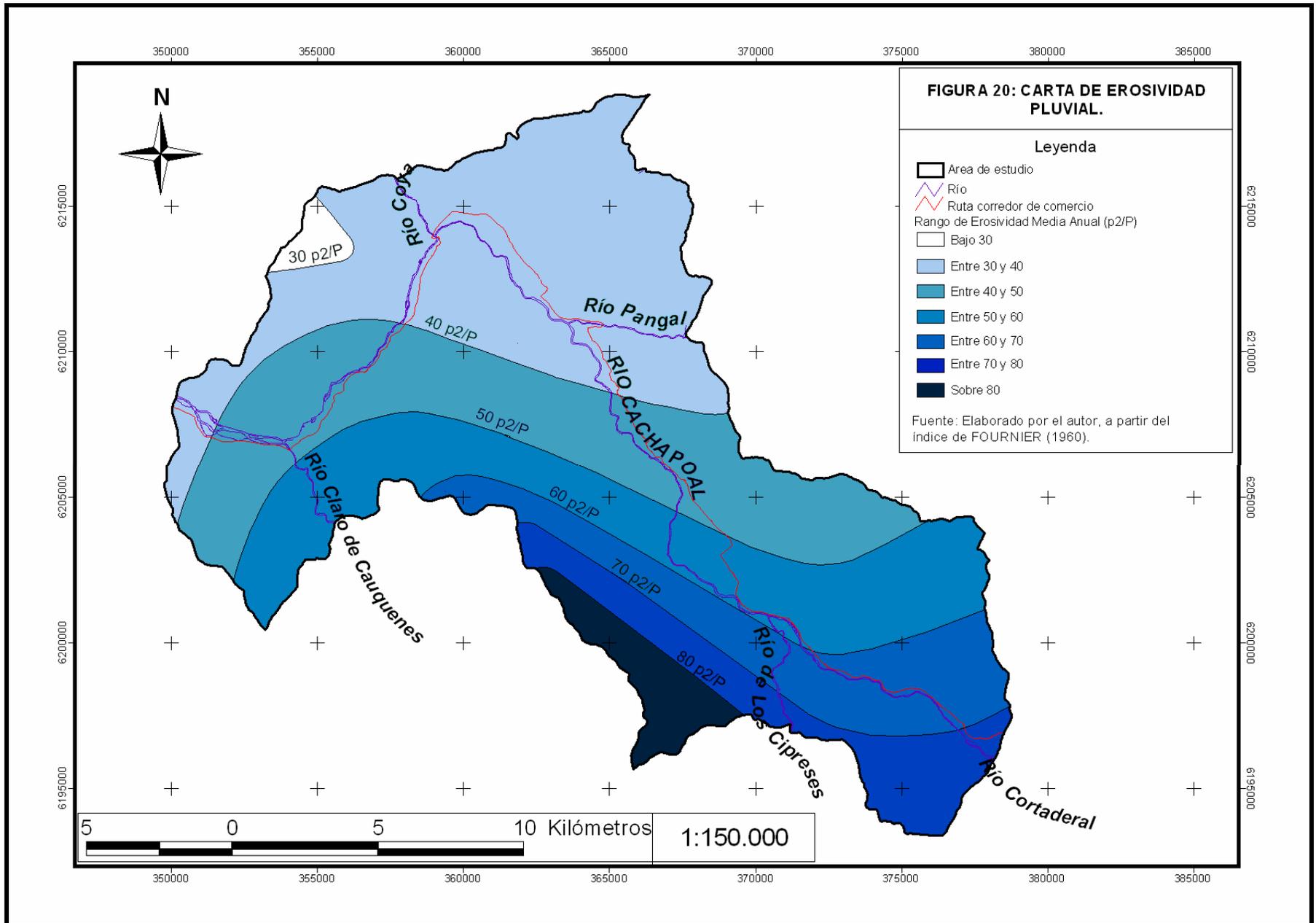
**TABLA 19: EROSIVIDAD PLUVIAL MEDIA ANUAL EN EL AREA DE ESTUDIO.**

Rango de Erosividad Media $p^2/P$	Grado de Erosividad	Superficie Km <sup>2</sup>
< 30 $p^2/P$	Medio	4 Km <sup>2</sup> (1,2%)
30 $p^2/P$ – 40 $p^2/P$	Medio	103,3 Km <sup>2</sup> (30,7%)
40 $p^2/P$ – 50 $p^2/P$	Medio	82,0 Km <sup>2</sup> (24,4%)
50 $p^2/P$ – 60 $p^2/P$	Alto	68,0 Km <sup>2</sup> (20,2%)
60 $p^2/P$ – 70 $p^2/P$	Alto	39,1 Km <sup>2</sup> (11,6%)
70 $p^2/P$ – 80 $p^2/P$	Alto	28,1 Km <sup>2</sup> (8,3%)
> 80 $p^2/P$	Alto	12,1 Km <sup>2</sup> (3,6%)

Fuente: Elaborado por el autor.

En el área de estudio los valores de erosividad pluvial fluctúan, aproximadamente, entre 30  $p^2/P$  y 80  $p^2/P$ . Estas cifras se distribuyen en el espacio aumentando gradualmente en función del incremento de las precipitaciones y el mayor efecto orográfico del relieve, por lo que las isolíneas de agresividad pluvial adquieren una dirección NW – SE. Según los grados de erosividad propuestos por MORGAN (1997), los valores en el sector de estudio fluctúan entre *medio* y *alto*. En el primero las precipitaciones anuales están distribuidas durante todo el año, aunque existe una temporada húmeda. Por el contrario, el segundo corresponde a un régimen pluviométrico más estacional, con una temporada húmeda que agrupa el mayor monto de lluvias durante el año.

Los rangos que tienen un moderado potencial erosivo, bajo 50  $p^2/P$ , se localizan en el extremo norte del área en baja y media montaña. En este sentido, el tramo que va entre 30  $p^2/P$  y 40  $p^2/P$  cubre la mayor superficie con 103,3 Km<sup>2</sup> (30,7%); así mismo, el rango entre 40  $p^2/P$  y 50  $p^2/P$  abarca una porción considerable del territorio en el sector central del valle con 82,0 Km<sup>2</sup> (24,4%). Aquellos rangos de agresividad pluvial cuyo potencial de erosión es alto, sobre 50  $p^2/P$ , se extienden desde el centro del valle hacia el extremo sur entorno a la línea divisoria de aguas, abarcando una superficie de 147,3 Km<sup>2</sup> (43,7%) en el ambiente de alta montaña, asociados a relieves sobre los 1.000 m.s.n.m debido al efecto orográfico, principalmente desde los 70  $p^2/P$ .



## 4.2.2 Características Topográficas

### 4.2.2.1 Exposición a la precipitación

Los relieves montañosos de Chile central, están expuestos a la acción de los sistemas frontales provenientes del océano Pacífico, principalmente, en los meses invernales. En este sentido, las masas nubosas que penetran en la cuenca alta del río Cachapoal, adquieren una dirección NW – SE debido a la configuración del valle, provocando diferencias en el impacto de los sistemas frontales, pues las vertientes ubicadas a barlovento (exposición noroeste), reciben directamente la precipitación, a diferencia de aquellas vertientes localizadas en sotavento (exposición sureste).

De esta forma, los rangos de exposición para la superficie estudiada se pueden agrupar en tres tipos que son barlovento, sotavento y cenital, y tres grados de erodabilidad en función de la precipitación (Tabla 20 y FIG.21).

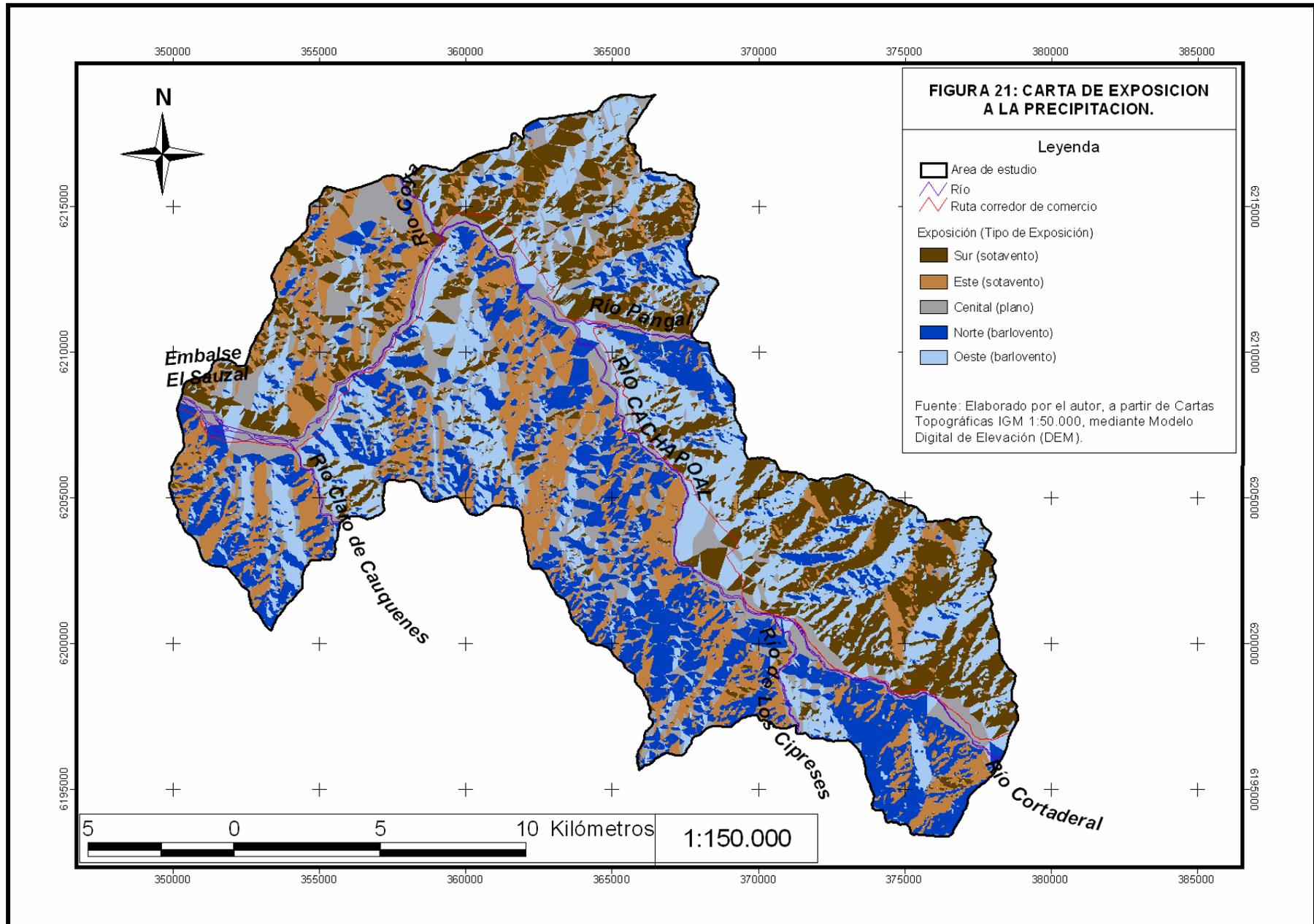
**TABLA 20: EXPOSICION A LA PRECIPITACION EN EL AREA DE ESTUDIO.**

Exposición (Tipo de Exposición)	Grado de Erodabilidad *	Superficie Km <sup>2</sup>
Sur (Sotavento)	Bajo	63,0 Km <sup>2</sup> (18,7%)
Este (Sotavento)	Bajo	57,8 Km <sup>2</sup> (17,1%)
Cenital (Plano)	Medio	64,8 Km <sup>2</sup> (19,3%)
Norte (Barlovento)	Alto	73,6 Km <sup>2</sup> (21,9%)
Oeste (Barlovento)	Alto	77,4 Km <sup>2</sup> (23,0%)

Fuente: Elaborado por el autor.

\*El grado de erodabilidad fue determinado por el autor de esta investigación.

El 35,8% de la superficie (120,8 Km<sup>2</sup>) no se ve afectada por la acción directa de la agresividad pluvial producto de la sombra pluviométrica, todo lo cual es resultado de la ubicación de las vertientes a *sotavento* con exposición sur y este. Sin embargo, la mayor parte del área posee una exposición a *barlovento* (44,9% con 151 Km<sup>2</sup>), que recibe la agresividad pluvial directamente, lo cual favorece la erosión en vertientes de exposición norte y oeste. Paralelamente, la exposición *cenital* (plana) que recibe la precipitación verticalmente abarca 64,8 Km<sup>2</sup> (19,3%), y esta asociada a formas del paisaje en fondo de valle, como lechos y terrazas fluviales con erodabilidad moderada.



#### 4.2.2.2 Pendiente según umbral geomorfológico

La variable pendiente permite establecer la geodinámica en vertientes y ambientes de montaña. En este sentido ARAYA – VERGARA & BORGEL (1972), YOUNG (1972) y FERRANDO (1993), realizaron una clasificación según el umbral geomorfológico, la que fue utilizada en el área de estudio para determinar del potencial erosivo según el rango de pendiente (Tabla 21 y FIG.22).

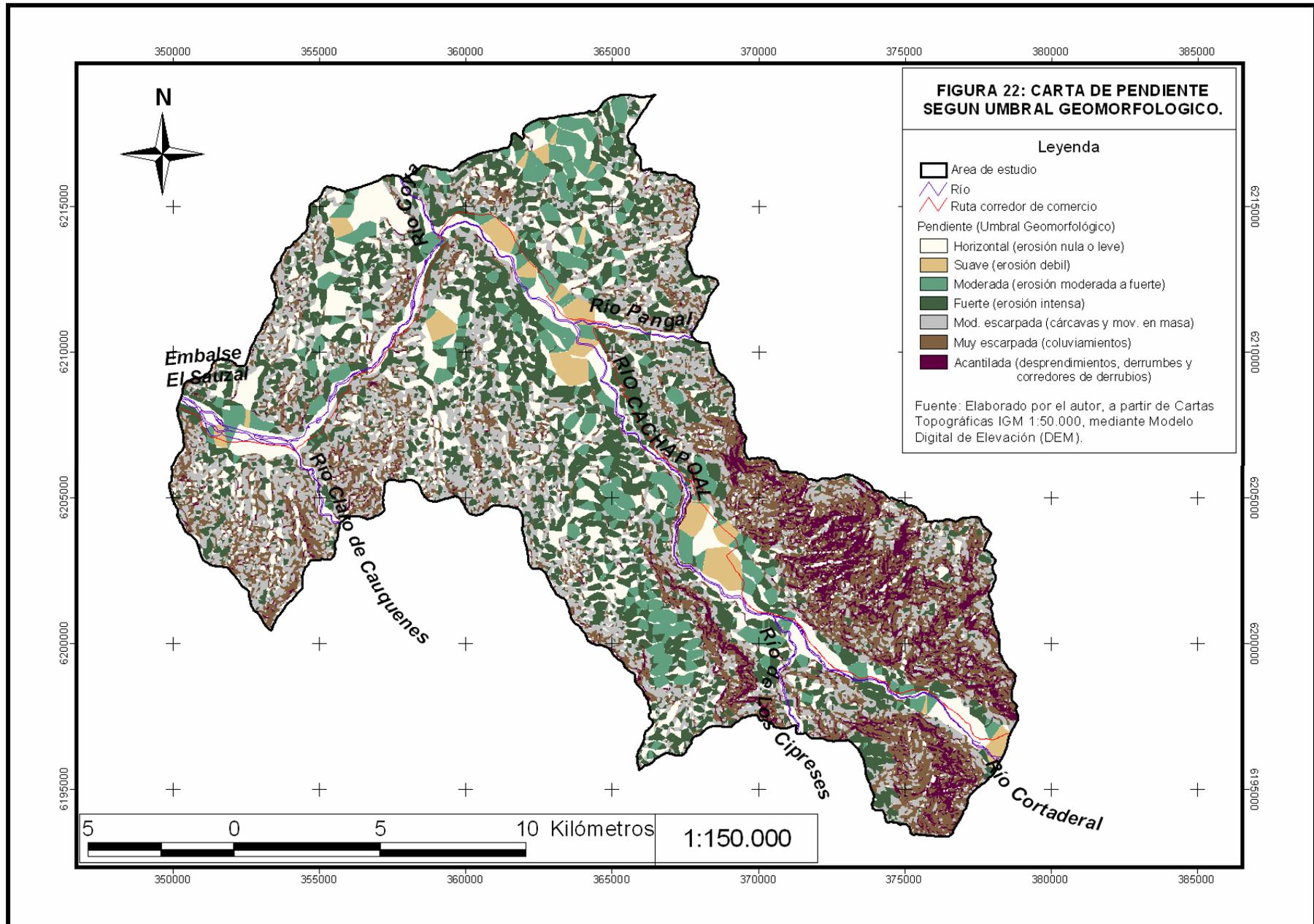
**TABLA 21: PENDIENTE SEGÚN UMBRAL GEOMORFOLÓGICO EN EL AREA DE ESTUDIO.**

Pendiente	Umbral Geomorfológico	Grado de Erodabilidad *	Superficie Km <sup>2</sup>
Horizontal (0° - 2°)	Erosión nula o leve	Bajo	65,0 Km <sup>2</sup> (19,3%)
Suave (2,1° - 5)	Erosión débil	Bajo	9,3 Km <sup>2</sup> (2,8%)
Moderada (5,1° - 10°)	Erosión moderada a fuerte	Medio	29,7 Km <sup>2</sup> (8,8%)
Fuerte (10,1° - 20°)	Erosión intensa	Alto	73,2 Km <sup>2</sup> (21,7%)
Moderadamente escarpada (20,1° - 30°)	Cárcavas y movimientos en masa	Alto	77,0 Km <sup>2</sup> (22,9%)
Muy escarpada (30,1° - 45°)	Coluviamientos	Muy Alto	62,4 Km <sup>2</sup> (18,6%)
Acantilada (45° y más)	Desprendimientos, derrumbes y corredores de derrubios	Muy Alto	20,0 Km <sup>2</sup> (5,9%)

Fuente: ARAYA – VERGARA & BORGEL (1972), YOUNG (1972) y FERRANDO (1993).

\*El grado de erodabilidad fue determinado por el autor de esta investigación.

Aquellas superficies con pendientes *horizontal* y *suave* poseen una baja erodabilidad, abarcando el 22,1% (74,3 Km<sup>2</sup>), en terrazas fluviales del río Cachapoal y en vertientes residuales de plateau, donde también es posible identificar pendientes *moderadas* con una erodabilidad media (29,7 Km<sup>2</sup> con el 8,8%). Sin embargo, la mayor parte de la superficie tiene un potencial erosivo alto, 150,2 Km<sup>2</sup> con el 44,6%, correspondiente a pendientes *fuertes* y *moderadamente escarpadas* asociadas a vertientes de estructura monoclinial en ambientes de baja y media montaña. Con una erodabilidad muy alta en vertientes de estructura concordante en media y alta montaña, se localizan pendientes *muy escarpadas* con una superficie de 62,4 Km<sup>2</sup> (18,6%), así como también pendientes *acantiladas* con 20,0 Km<sup>2</sup> (5,9%), asociadas también a una erodabilidad muy alta en las quebradas El Tinajón, de Peralitos y Retamal, con un área de 20,0 Km<sup>2</sup> (5,9%).



### 4.2.3 Características Geológicas

#### 4.2.3.1 Evolución geológica general

La evolución geológica del sector fue descrita por CHARRIER (1983), quien localiza esta área en la vertiente occidental de la *cordillera central*, unidad que pertenece a un orógeno desarrollado durante el *Mesozoico* y el *Cenozoico*, que tiene una orientación N – S, bordeando el oeste a América del Sur. Durante su evolución se sucedieron seis fases de plegamiento, asociadas a un levantamiento generalizado del continente, las que fueron sucedidas por un fallamiento de bloques que determinó la configuración morfoestructural en toda la región.

A fines del *Neocomiano* se produjo un levantamiento del territorio continental, con un retiro del mar desde la vertiente oriental del cordón volcánico. El levantamiento fue acompañado en esta región por un importante episodio de erosión y plegamiento, lo que se tradujo en la discordancia que separa a la *Formación Coya – Machalí* de las unidades más antiguas. En esta etapa se inicia el desarrollo de un importante relieve montañoso en el borde continental, el cual, a pesar de sucesivos episodios de intensa erosión y hundimiento, impidió en épocas posteriores, que el mar volviera a cubrir el ambiente cordillerano, provocando un cambio en la evolución paleogeográfica. En este relieve montañoso, volcánicamente activo (formado en el *Cretácico Superior* y/o *Terciario Inferior*, en el sector occidental del área estudiada), se generaron detritos volcánicos, piroclásticos y coladas calco – alcalinas que componen las rocas de la *Formación Coya – Machalí*.

En el *Mioceno inferior* se produjo un nuevo levantamiento del continente, acompañado de una fuerte erosión y plegamiento de la *Formación Coya – Machalí* y de las unidades más antiguas. Esto provocó que sobre esta unidad, y con una marcada discordancia angular, se depositaran las volcanitas calco – alcalinas, pertenecientes a la *Formación Farellones*, originadas en un nuevo cordón volcánico de orientación N – S ubicado más al este que el anterior. Durante el *Mioceno superior* se produjo un suave plegamiento de esta Formación, iniciándose su erosión, la que se mantiene hasta el presente.

Las formaciones ya mencionadas (*Coya – Machalí* y *Farellones*), fueron instruidas probablemente durante episodios diferentes por plutones, tal vez, pertenecientes a un complejo batolítico que originó los diferentes cordones volcánicos mencionados.

Durante el *Pleistoceno* se desarrolló una intensa glaciación que modeló el relieve, determinando la acumulación de importantes depósitos morrénicos. Una vez terminada la última glaciación, la gravedad, así como los procesos periglaciares y fluviales, continúan actuando sobre las unidades señaladas, generando detritos que caen desde las partes altas, modificando las vertientes y rellenando el fondo de valle.

#### 4.2.3.2 Unidades geológicas en el área

Las unidades geológicas reconocidas para el área corresponden principalmente a depósitos sedimentarios y volcánicos (FIG.23), cuyas edades fluctúan entre el *Cretácico superior* y el *Cuaternario*, de acuerdo a la *Carta Geológica de Chile, Hoja El Teniente 1:250.000*, de CHARRIER (1983) y al *Mapa Geológico de la Cordillera de los Andes de Chile Central* perteneciente a KLOHN (1960). La determinación de erodabilidad geológica potencial se basó en la clasificación aplicada por KUHNI y PFIFFNER (2001) en los Alpes Suizos (Tabla 22).

**TABLA 22: UNIDADES GEOLÓGICAS EN EL AREA DE ESTUDIO.**

Unidad Geológica (Denominación)	Tipo de Roca	Grado de Erodabilidad	Superficie Km <sup>2</sup>
Formación Coya - Machalí	Vulcanitas y sedimentos continentales	Medio	111,3 Km <sup>2</sup> (33%)
Formación Farellones	Vulcanitas y sedimentos continentales	Medio	94,5 Km <sup>2</sup> (28,1%)
Rocas Intrusivas	Granodiorita y rocas asociadas	Bajo	13,1 Km <sup>2</sup> (3,9%)
Depósitos no Consolidados	Relleno aluvial y glacial	Alto	117,7 Km <sup>2</sup> (35%)

Fuente: Elaborado por el autor a partir de CHARRIER (1983) y KLOHN (1960).

A continuación se describen las unidades en orden decreciente de edad:

a) Formación Coya – Machalí (Cretácico superior – Terciario inferior): Fue definida como Formación Chilense por KLOHN (1957). Posteriormente, el mismo autor en 1960 la denominó *Formación Coya – Machalí*, precisando como localidad típica la serranía de orientación N – S, entre Coya y Machalí.

Es una secuencia volcánica continental de carácter calco – alcalino, que se compone de lavas, piroclastitas, conglomerados, areniscas, limonitas y margas. Las lavas corresponden predominantemente a andesitas y riolitas. Las piroclastitas están compuestas por bloques, lapillis y cenizas, que pertenecen a variedades riolíticas. La Formación Coya – Machalí posee una moderada susceptibilidad a ser degradada.

Esta formación aflora en regiones profundamente erodadas de la Formación Farellones, como en el valle del río Cachapoal. Se presenta superficialmente en el sector occidental del área en estudio, al oeste de la desembocadura del río Pangal, donde tiene un espesor de por lo menos 1.900 m, abarcando un área de 111,3 Km<sup>2</sup> (33%). Se presenta deformada, con pliegues de orientación N – S y una clara vergencia oeste. Sus características permiten deducir un plegamiento producto de deslizamientos por flexura (CHARRIER, 1981 b).

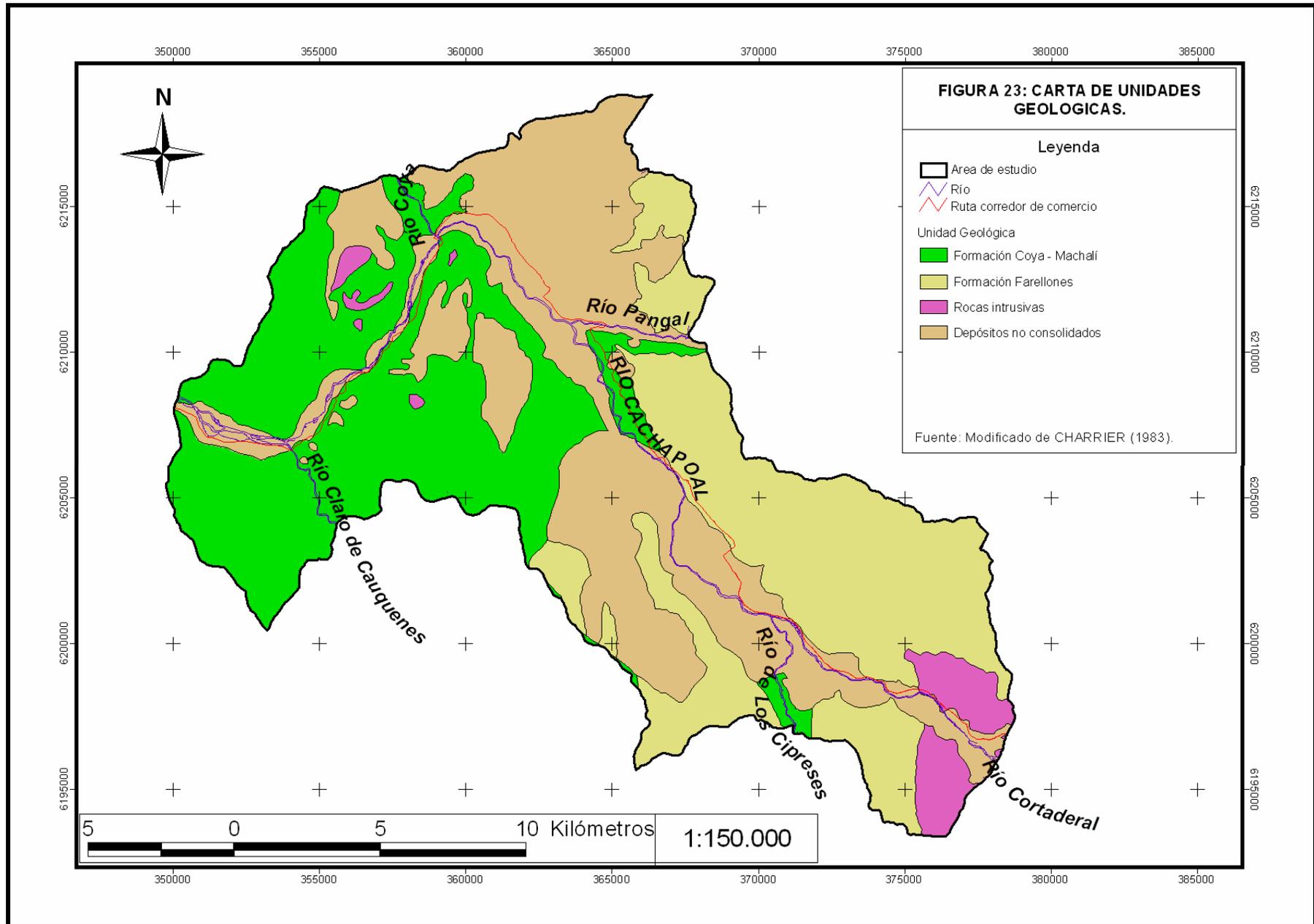
b) Formación Farellones (Terciario, Mioceno superior): El término *Formación de los Farellones* fue introducido en 1953 por Jorge Muñoz Cristi, quien lo utilizaba oralmente y en forma inédita para referirse a la secuencia esencialmente volcánica y continental que aflora en la localidad homónima al este de Santiago. KLOHN (1957) lo utilizó en su primera publicación sobre la geología de la cordillera de Chile central, y posteriormente, este autor se refirió a la misma unidad con el nombre de *Formación Farellones*.

Corresponde a depósitos volcánicos continentales de coladas porfíricas y afaníticas; así como piroclastitas, en donde se reconocen lapillitas y tobas, predominantemente andesíticas con un carácter calco – alcalino. Las rocas de esta Formación presentan una erodabilidad moderada.

La Formación Farellones se dispone con discordancia angular sobre la Formación Coya – Machalí, y las capas más altas constituyen el actual límite superior de erosión. Esta unidad es resultado de la actividad volcánica andesítica, centrada muy probablemente a lo largo de la franja actual de afloramiento (CHARRIER, 1981 b). En el valle de media y alta montaña del río Cachapoal cubre 94,5 Km<sup>2</sup> (28,1%), mayoritariamente en la ribera norte. Los estratos de esta unidad se presentan suavemente plegados, según ejes de orientación N – S, con un espesor de por lo menos 2.400 m.

c) Rocas intrusivas (Terciario): Esta unidad representa tan solo el 3,9% de la superficie (13,1 Km<sup>2</sup>), e intruye a las formaciones anteriormente mencionadas. Se presenta al oeste de la desembocadura del río Coya, como pequeños afloramientos asilados del tipo *stock*, de rocas pórfido andesíticas, cuya caja de formación es la unidad Coya – Machalí. Así mismo, entorno a la confluencia del río Cortaderal se extiende un tramo del Batolito Universal, de diorita y granodiorita, que es el mayor cuerpo intrusivo en esta región cordillerana. Presentan una baja erodabilidad frente a los agentes externos de erosión, pues corresponden a rocas graníticas.

d) Depósitos no consolidados (Cuaternarios): Los depósitos no consolidados dentro del área están constituidos por sedimentos aluviales (fluviales, lacustres y glaciofluviales), depósitos de glaciares, depósitos de escombros y materiales de derrumbes. Cubren el fondo de todo el valle del río Cachapoal y de los valles tributarios, por lo tanto están ampliamente representados, con una superficie de 117,7 Km<sup>2</sup> (35%). Esto da cuenta de los procesos erosivos que se han desarrollado durante el Cuaternario. Por ser rocas sedimentarias poseen una alta vulnerabilidad a la acción de los agentes de erosión.



#### **4.2.4 Características Misceláneas Superficiales**

##### **4.2.4.1 Depósitos sedimentarios y terrenos rocosos**

Para el valle del río Cachapoal CIREN – CORFO (1996) ha descrito diferentes tipos de depósitos y terrenos rocosos, no diferenciados, en función de sus suelos o subsuelos posibles de asociar a unidades geomorfológicas. Estas categorías son las siguientes:

a) Misceláneo aluvial (MA): Depósitos aluviales correspondientes a abanicos en la parte baja de las montañas, donde se han formado suelos delgados, inclinados, de textura arenosa y pedregosidad abundante. Poseen una buena a regular vegetación arbustiva y herbácea.

b) Misceláneo coluvial (MC): Terrenos pedregosos, disectados, formando abanicos en la parte media y baja de las montañas. Están constituidos por gravas y bolones heterogéneamente repartidos, no consolidados, con matriz preferentemente de textura arenosa fina a franco arenosa.

c) Terrenos rocosos (R): Afloramientos rocosos de las formaciones petrográficas. Se ubican en la cima cordillerana, desprovistas de vegetación arbórea y una escasa vegetación arbustiva. En la cordillera de los Andes dominan las rocas eruptivas básicas y neutras.

d) Terrazas aluviales del río Cachapoal (TH): Suelos de las terrazas recientes del río Cachapoal, estratificados, delgados a ligeramente profundos, de texturas medias a gruesas, sobre substratos de arenas y gravas, permeables; el drenaje es variable, el 50% de ellos presenta buen drenaje, un 30% drenaje moderado y 20% drenaje imperfecto. Un 20% de las variaciones están afectadas por problemas de inundaciones ocasionales (Anexo 1). Pueden dividirse en tres grupos de suelos:

- Suelos planos, delgados, estratificados, texturas moderadamente gruesas a medias predominantes, bien drenados, libres de piedras o con ligera pedregosidad.

- Suelos planos, moderadamente profundos, estratificados, de texturas medias a moderadamente gruesas, drenaje moderado a bueno, libres de pedregosidad.

- Suelos planos, delgados a moderadamente profundos, estratificados, de texturas moderadamente gruesas, drenaje imperfecto a pobre, con niveles freáticos.

##### **4.2.4.2 Caracterización de suelos en fondo de valle**

En terreno se obtuvieron muestras de suelo, que describen las características en las formas de origen aluvial ubicadas en fondo de valle, tomadas en siete puntos diferentes entre la media y la alta montaña (FIG.24 y 25). Las características morfológicas y granulométricas se describen a continuación en las Tablas 23 y 24, respectivamente.

FIGURA 24: PUNTOS DE MUESTRO DE SUELOS EN FONDO DE VALLE.

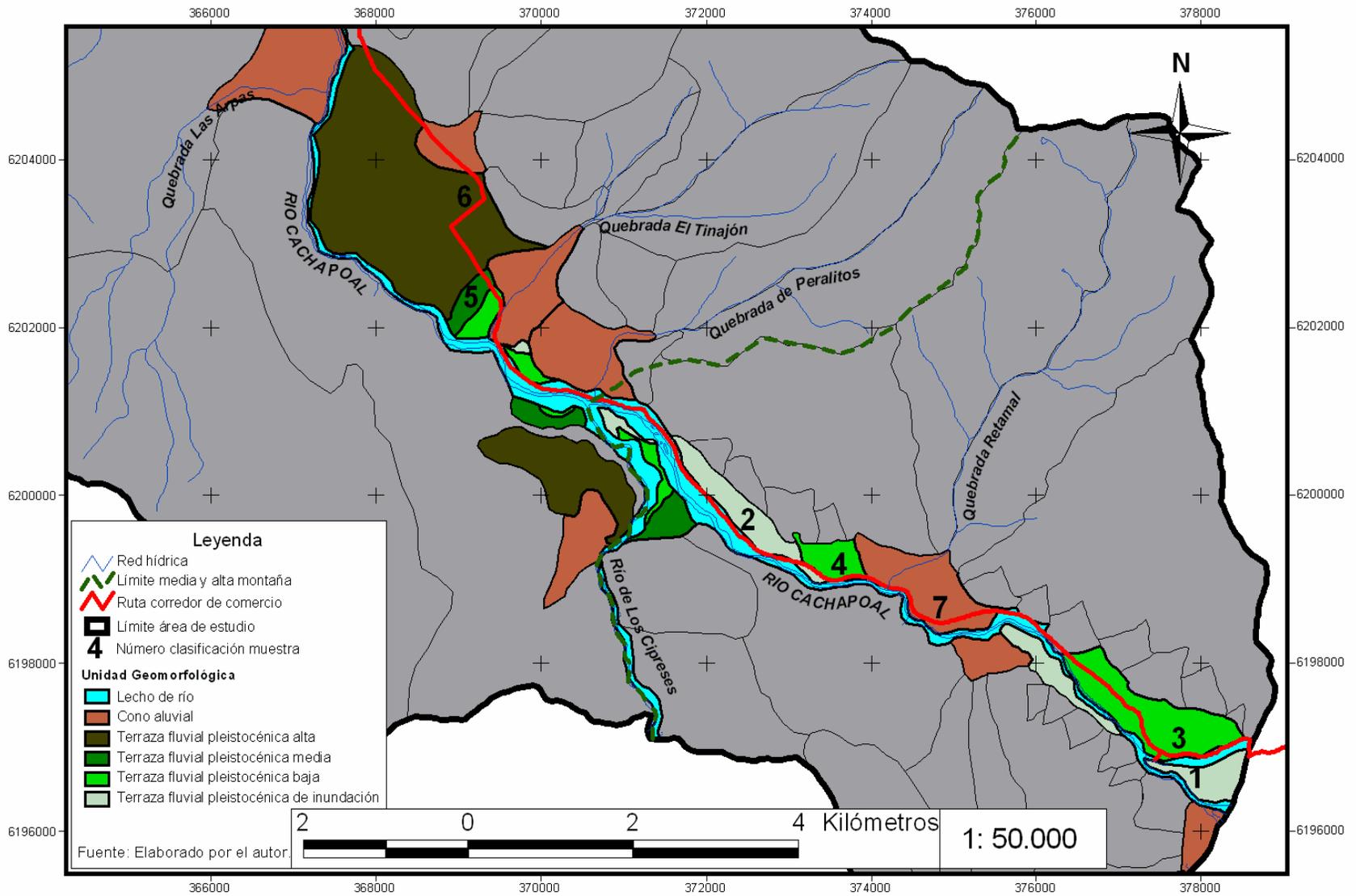
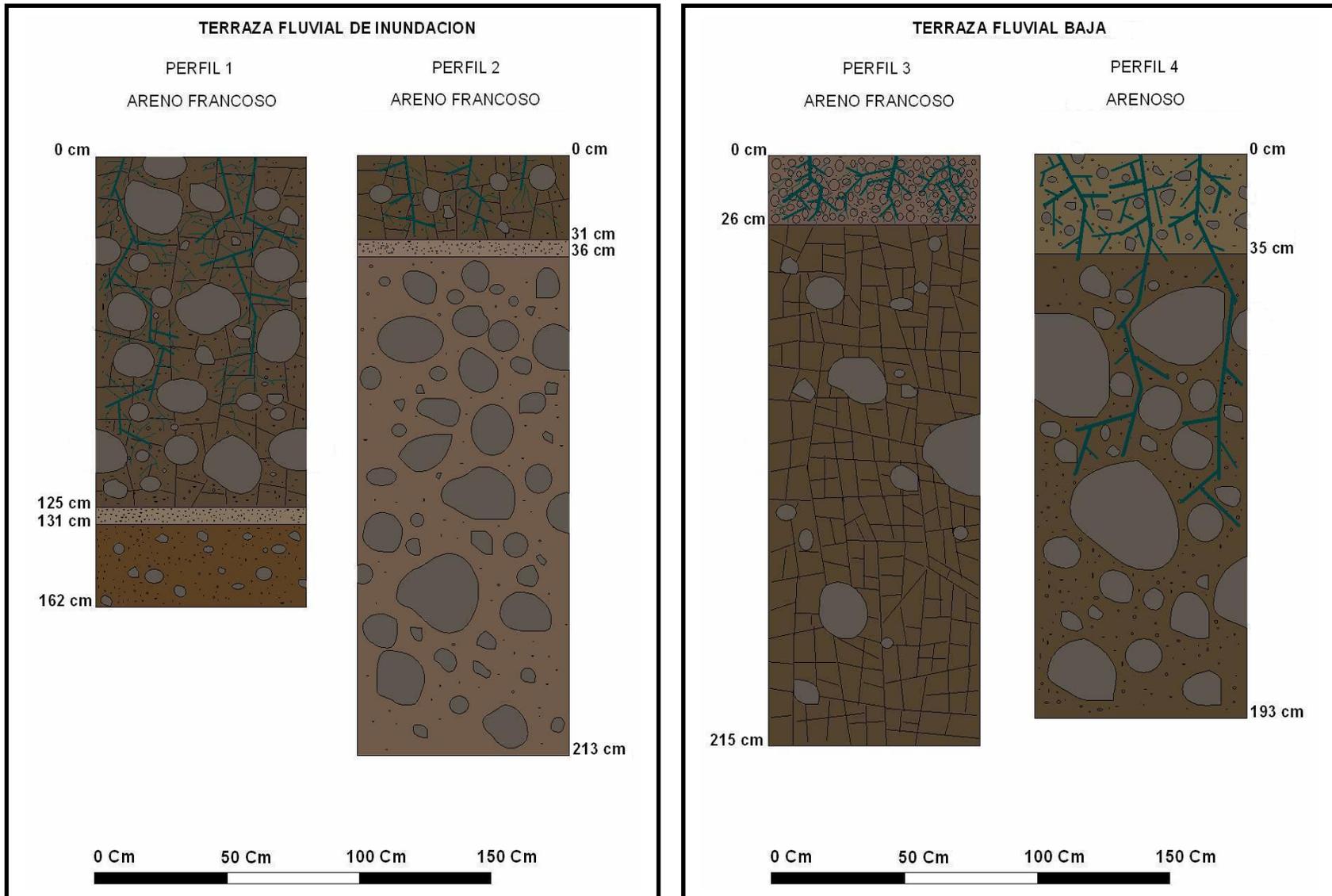
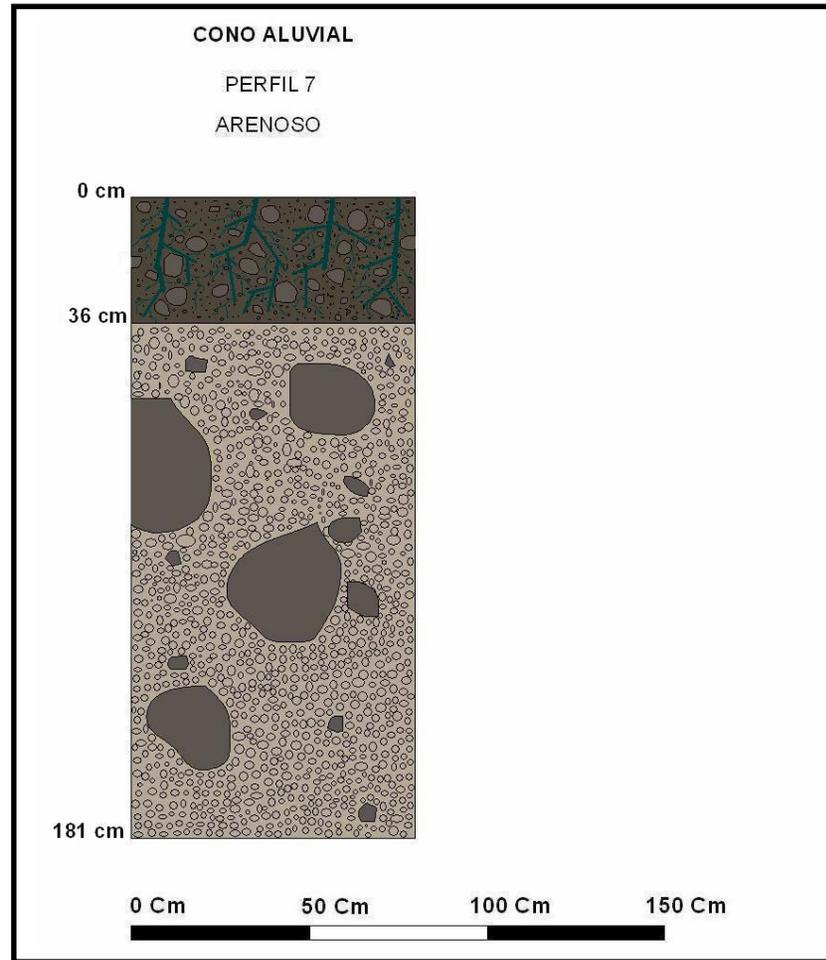
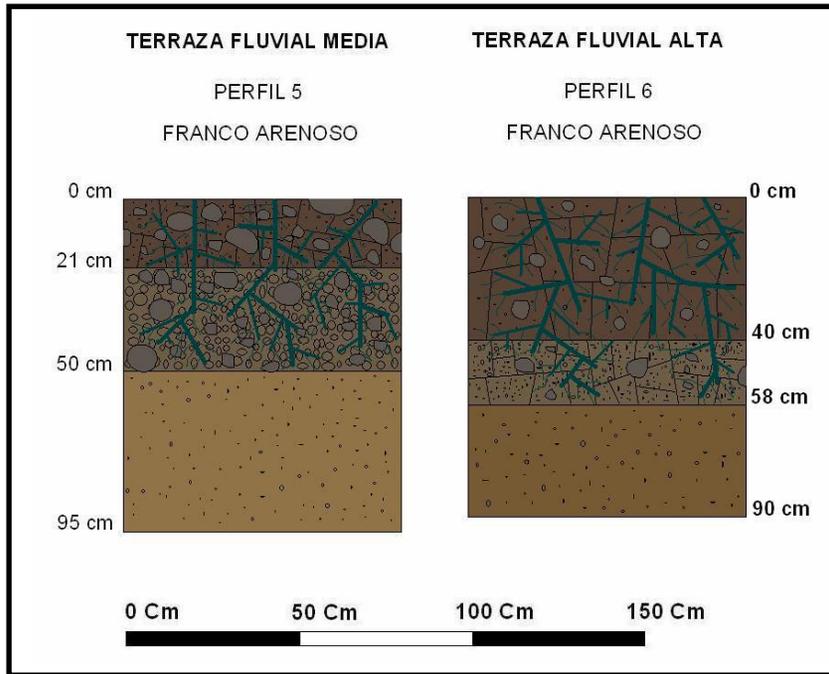


FIGURA 25: PERFILES DE SUELOS EN FONDO DE VALLE.





Fuente: Elaborado por el autor.

**TABLA 23: CARACTERISTICAS MORFOLOGICAS GENERALES POR PERFIL.**

Perfil	Posición Geomorfológica	Pendiente	Profundidad	Color Superficial	Porosidad Superficial	Agrupación Textural Sup.	Estructura Superficial	Fragmentos Gruesos Superficiales	Perm.
1	Terraza fluvial pleistocénica de inundación	2% Suavemente inclinada	Profundo	Pardo oscuro (7,5 YR 3/2)	Finos comunes	Gruesa	Bloques subangulares medios moderados	Gravas, piedras y bloques que ocupan un 40% del volumen del suelo	Alta
2	Terraza fluvial pleistocénica de inundación	2% Suavemente inclinada	Profundo	Pardo muy oscuro (10 YR 3/2)	Finos escasos	Gruesa	Bloques subangulares medios débiles	Gravas, piedras y bloques escasos	Alta
3	Terraza fluvial pleistocénica baja	2% Suavemente inclinada	Profundo	Pardo grisáceo muy oscuro (2,5 YR 4/2)	Finos abundantes	Gruesa	Granular gruesa débil	Ausencia de fragmentos gruesos	Alta
4	Terraza fluvial pleistocénica baja	4% Moderadamente inclinada	Profundo	Pardo grisáceo oscuro (10 YR 4/2)	Medios comunes	Muy gruesa	Grano simple (no estructura)	Gravas comunes	Alta
5	Terraza fluvial pleistocénica media	2% Suavemente inclinada	Moderadamente profundo	Pardo rojizo oscuro (5 YR 3/2)	Finos y medios abundantes	Media	Bloques subangulares medios moderados	Gravas y piedras que ocupan un 20% del volumen del suelo	Moderada
6	Terraza fluvial pleistocénica alta	2% Suavemente inclinada	Moderadamente profundo	Pardo rojizo oscuro (5 YR 3/2)	Medios abundantes	Media	Bloques subangulares gruesos moderados	Gravas escasas	Moderada
7	Abanico aluvial (Cono de deyección caótico)	9% Fuertemente inclinada	Profundo	Pardo muy oscuro (10 YR 2/1)	Finos, medios y gruesos abundantes	Gruesa	Grano simple (no estructura)	Gravas comunes	Alta

Fuente: Elaborado por el autor.

**TABLA 24: CARACTERISTICAS GRANULOMETRICAS POR PERFIL.**

Perfil	Horizonte	Profundidad cm.	% Arcilla	% Limo	% Arena	Clase Textural
1	A	0 – 125	8.3%	13.8 %	77.9%	<i>areno francosa</i>
	C	125 – 131	2.3%	4.9 %	92.8%	<i>arenosa</i>
	C	131 – 162	3.3%	6.8 %	89.9%	<i>arenosa</i>
2	A	0 – 31	4.1%	13.9 %	82.0%	<i>areno francosa</i>
	C	31 – 36	0.2%	1.0 %	98.8%	<i>arenosa</i>
	C	36 – 213	0.2%	2.0 %	97.8%	<i>arenosa</i>
3	A	0 – 26	3.1%	15.7 %	81.2%	<i>areno francosa</i>
	B	26 – 215	12.9%	17.4 %	69.7%	<i>franco arenosa</i>
4	A	0 – 35	1.1%	5.9 %	93.0%	<i>arenosa</i>
	C	35 – 193	1.4%	2.0 %	96.6%	<i>arenosa</i>
5	A	0 – 21	8.9%	25.4 %	65.7%	<i>franco arenosa</i>
	B	21 – 50	7.4%	11.4 %	81.2%	<i>areno francosa</i>
	C	50 – 95	3.2%	10.9 %	85.9%	<i>arenosa</i>
6	A	0 – 40	12.5%	20.0 %	67.5%	<i>franco arenosa</i>
	B	40 – 58	7.0%	23.7 %	69.3%	<i>Franco arenosa</i>
	C	58 – 90	2.2%	2.4 %	95.4%	<i>arenosa</i>
7	A	0 – 36	2.6%	10.8 %	86.6%	<i>arenosa</i>
	C	36 – 181	4.6%	10.9 %	84.5%	<i>areno francosa</i>

Fuente: Elaborado por el autor.

A partir de las características morfológicas y granulométricas de los perfiles, fue posible determinar las condiciones pedológicas generales por unidad geomorfológica analizada, las que fueron asociadas a las clasificaciones propuestas por CIREN – CORFO (1996), que para el caso de las terrazas aluviales del río Cachapoal, son correlativas a ciertas variaciones de la clasificación del mismo nombre (TH):

a) Terrazas fluviales pleistocénicas de inundación: Suelos de origen aluvial, profundos, de color pardo oscuro a muy oscuro, la agrupación textural es gruesa con una clase textural areno francosa sobre substrato de arenas, la estructura es de bloques subangulares medios débiles a medios moderados, con fragmentos gruesos de gravas y una permeabilidad alta. Correlativos a la variación TH – 10, que son suelos sometidos a inundaciones periódicas.

b) Terrazas fluviales pleistocénicas bajas: Suelos aluviales, profundos, de color pardo grisáceo muy oscuro a pardo oscuro, la agrupación textural es gruesa a muy gruesa con una clase textural areno francosa a arenosa, la estructura es granular gruesa, con gravas comunes y una permeabilidad alta. Asociados a TH – 8, que es una variación donde los suelos areno francosos sufren inundaciones frecuentes.

c) Terrazas fluviales pleistocénicas medias: Suelos de origen aluvial, moderadamente profundos, de color pardo rojizo oscuro, la agrupación textural es media y la clase textural franco arenosa sobre substrato areno francoso, la estructura es de bloque subangulares medios moderados, las gravas y las piedras ocupan un 20% del volumen y una permeabilidad moderada. Relacionados a TH – 7, que son suelos franco arenosos con ligera pedregosidad superficial, sometidas a inundaciones ocasionales.

d) Terrazas fluviales pleistocénicas altas: Estas superficies tienen suelos de origen aluvial, moderadamente profundos, de color pardo rojizo, agrupación textural media y clase textural franco arenosa, la estructura es de bloque subangulares gruesos moderados, presenta gravas escasas y una permeabilidad moderada. Se correlacionan a la variación TH – 6 de textura franco arenoso y bien drenado.

e) Abanicos aluviales: Suelos correspondientes a depósitos de las cuencas tributarias, fuertemente inclinados, profundos, de color pardo muy oscuro, la agrupación textural es gruesa y la clase textural arenosa, no poseen estructura (granos simples), tienen gravas comunes y poseen una permeabilidad alta. Pueden ser relacionados con la descripción de Misceláneo Aluvial (MA).

#### **4.2.4.3 Formaciones superficiales en el área**

Según la información recopilada en la etapa de gabinete y en terreno, se identificaron las unidades superficiales dentro del área de estudio, gran parte de las cuales fueron asociadas a las formas del paisaje en fondo de valle, que corresponden a depósitos no consolidados (Tabla 25 y FIG.26).

**TABLA 25: FORMACIONES SUPERFICIALES EN EL AREA DE ESTUDIO.**

Formación Superficial (Granulometría)	Unidad Geomorfológica	Unidad CIREN - CORFO	Grado de Erodabilidad*	Superficie Km <sup>2</sup>
Material rocoso	Sistemas de Vertientes (principalmente de influencia estructural)	Terrenos Rocosos (R)	Bajo	292 Km <sup>2</sup> (86,7%)
Material detrítico no consolidado, con una matriz arenosa a franco arenosa	Abanico Coluvial (talud)	Misceláneo Coluvial (MC)	Moderadamente bajo	3,8 Km <sup>2</sup> (1,1%)
Material de textura heterogénea	Morrena	Sin Clasificación	Moderadamente bajo	3 Km <sup>2</sup> (0,9%)
Arenosa con pedregosidad abundante	Abanico Aluvial	Misceláneo Aluvial (MA)	Moderadamente alto	10,7 Km <sup>2</sup> (3,2%)
Areno francosa	Terraza fluvial pleistocénica de inundación	Terrazas Aluviales del Río Cachapoal (TH – 10)	Moderadamente alto	20,3 Km <sup>2</sup> (6,0%)
Arenosa a areno francosa	Terraza fluvial pleistocénica baja	Terrazas Aluviales del Río Cachapoal (TH – 8)	Moderadamente alto	
Franco arenosa	Terraza fluvial pleistocénica media	Terrazas Aluviales del Río Cachapoal (TH – 7)	Alto	
	Terraza fluvial pleistocénica alta	Terrazas Aluviales del Río Cachapoal (TH – 6)	Alto	

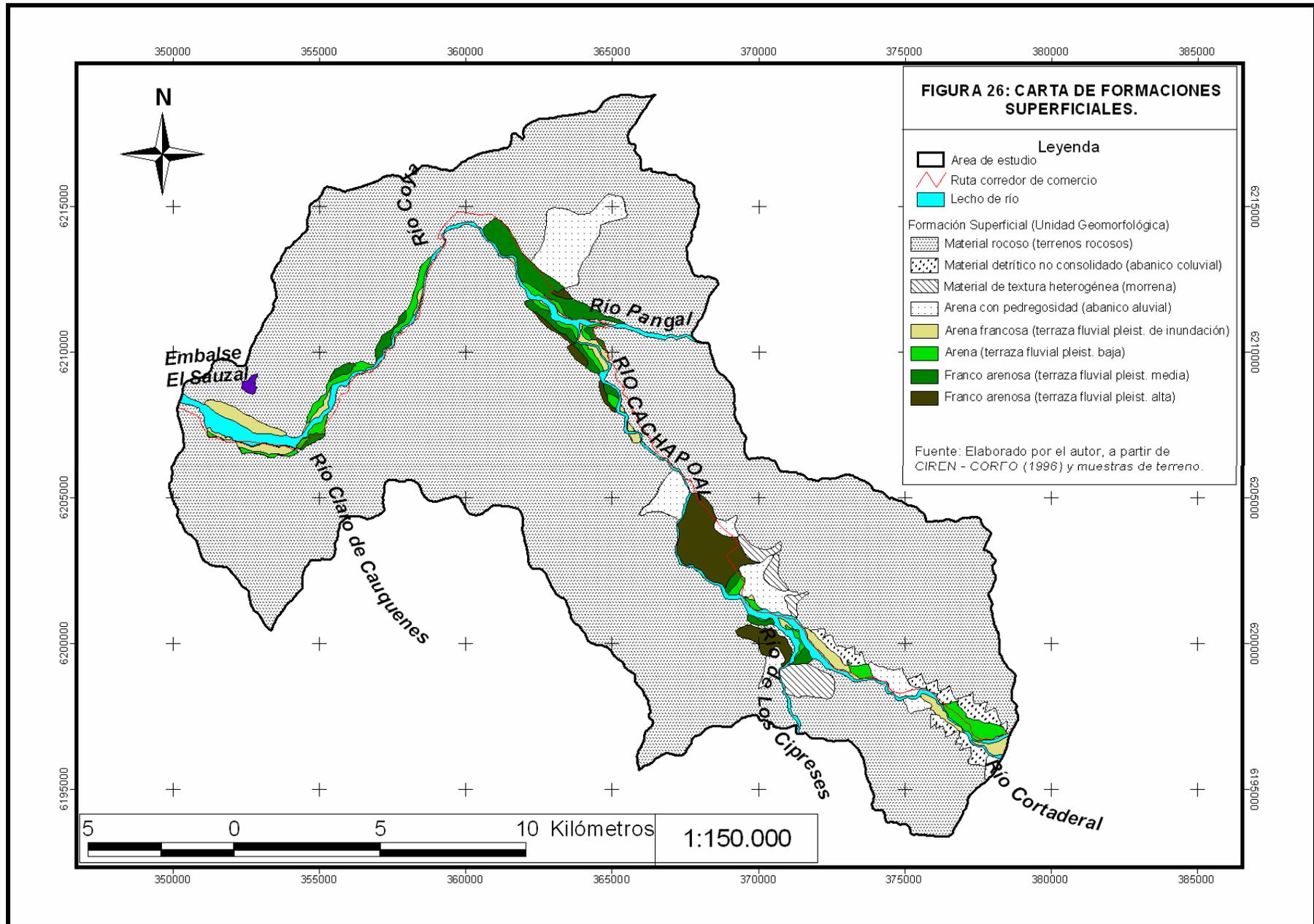
Fuente: Elaborado por el autor a partir del CIREN – CORFO (1996) y muestras obtenidas en terreno.

\* El grado de erodabilidad fue determinado por el autor de esta investigación a partir de autores como GOMEZ OREA (1994), DE PEDRAZA (1996), entre otros.

La mayor parte de la superficie, es decir el 86,7%, corresponde a los terrenos rocosos de los sistemas de vertientes, constituidos por las formaciones geológicas del sector, los que han sido clasificados con la letra R. Como son materiales consolidados, con poca permeabilidad, poseen una baja susceptibilidad a ser erosionados por los agentes externos como la precipitación.

Sin embargo, el resto de las unidades superficiales en fondo de valle poseen un mayor potencial erosivo, pues son depósitos de materiales menos consolidados con respecto a las rocas. En este sentido, las formas de contacto entre valle y montaña, abanicos coluviales y aluviales, poseen sedimentos con texturas gruesas que permiten una alta permeabilidad y drenaje. Los conos de detritos ubicados en el tramo de alta montaña, entre los ríos Cortaderal y de Los Cipreses, se clasificaron como Misceláneo Coluvial (MC), de terrenos pedregosos no consolidados, una erodabilidad moderadamente baja por el buen drenaje y la escasa retención de humedad. Los abanicos de origen aluvial localizados en media montaña entorno a cuencas tributarias, corresponden a los suelos del Misceláneo Aluvial (MA) de textura arenosa y pedregosidad abundante, con una erodabilidad moderadamente alta, por la mayor saturación de los materiales en relación a los depósitos detríticos.

Los suelos de los cuatro niveles de terrazas aluviales del río Cachapoal pertenecen a la clasificación homónima (TH), ubicados preferentemente en baja y media montaña, pero debido a las diferencias en las características y la recurrencia de las inundaciones, se determinaron las variaciones correspondientes. Las terrazas fluviales de inundación y baja, poseen una agrupación textural que va de gruesa a muy gruesa, permeabilidad alta, inundaciones frecuentes a periódicas y un potencial erosivo moderadamente alto. Paralelamente, las terrazas fluviales pleistocénicas medias y altas, poseen suelos de textura franco arenosa con una permeabilidad y saturación moderada, inundaciones menos frecuentes, todo lo cual favorece una erodabilidad que fue clasificada como alta.



### 4.3 DEFINICION DE ERUs PARA EL AREA DE ESTUDIO

#### 4.3.1 Análisis Jerarquizado

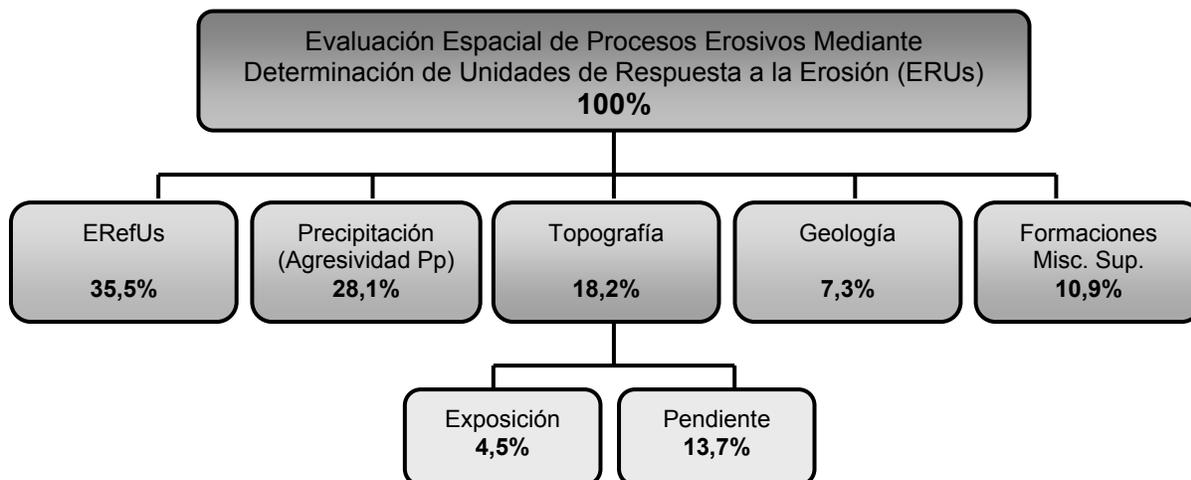
La jerarquización de variables, subvariables y categorías consideradas en la evaluación de procesos erosivos en el valle del río Cachapoal a través del método multicriterio, empleando el Proceso Analítico Jerárquico, entregó como resultado los pesos según el nivel de importancia, los que se muestran a continuación en la Tabla 26 y FIG.27.

**TABLA 26: PESOS DE VARIABLES Y CATEGORÍAS SEGÚN IMPORTANCIA.**

Variable	Categoría	Peso Variable	Peso Total Variable
<b>Unidades de Referencia a la Erosión (ERefUs)</b>		<b>0,35530</b>	
	Bajo	0,02782	0,00989
	Moderadamente bajo	0,04262	0,01514
	Moderadamente alto	0,05655	0,02009
	Alto	0,08624	0,03064
	Muy alto	0,14207	0,05048
<b>Precipitación (Agresividad Pluvial)</b>		<b>0,28045</b>	
	Medio	0,09348	0,02622
	Alto	0,18697	0,05244
<b>Topografía</b>		<b>0,18233</b>	
<b>Exposición</b>		<b>0,04558</b>	
	Bajo	0,00745	0,00034
	Medio	0,01354	0,00062
	Alto	0,02460	0,00112
<b>Pendiente</b>		<b>0,13675</b>	
	Bajo	0,01305	0,00178
	Medio	0,02189	0,00299
	Alto	0,03790	0,00518
	Muy alto	0,06390	0,00874
<b>Geología</b>		<b>0,07332</b>	
	Bajo	0,00894	0,00066
	Medio	0,02343	0,00172
	Alto	0,04094	0,00300
<b>Formaciones Misceláneas Superficiales</b>		<b>0,10860</b>	
	Bajo	0,01002	0,00109
	Moderadamente bajo	0,01422	0,00154
	Moderadamente alto	0,03208	0,00348
	Alto	0,05228	0,00568
<b>Valor Inconsistencia</b>		<b>0,02217</b>	

Fuente: Elaborado por el autor.

**FIGURA 27: ESTRUCTURA JERARQUICA SEGÚN IMPORTANCIA.**



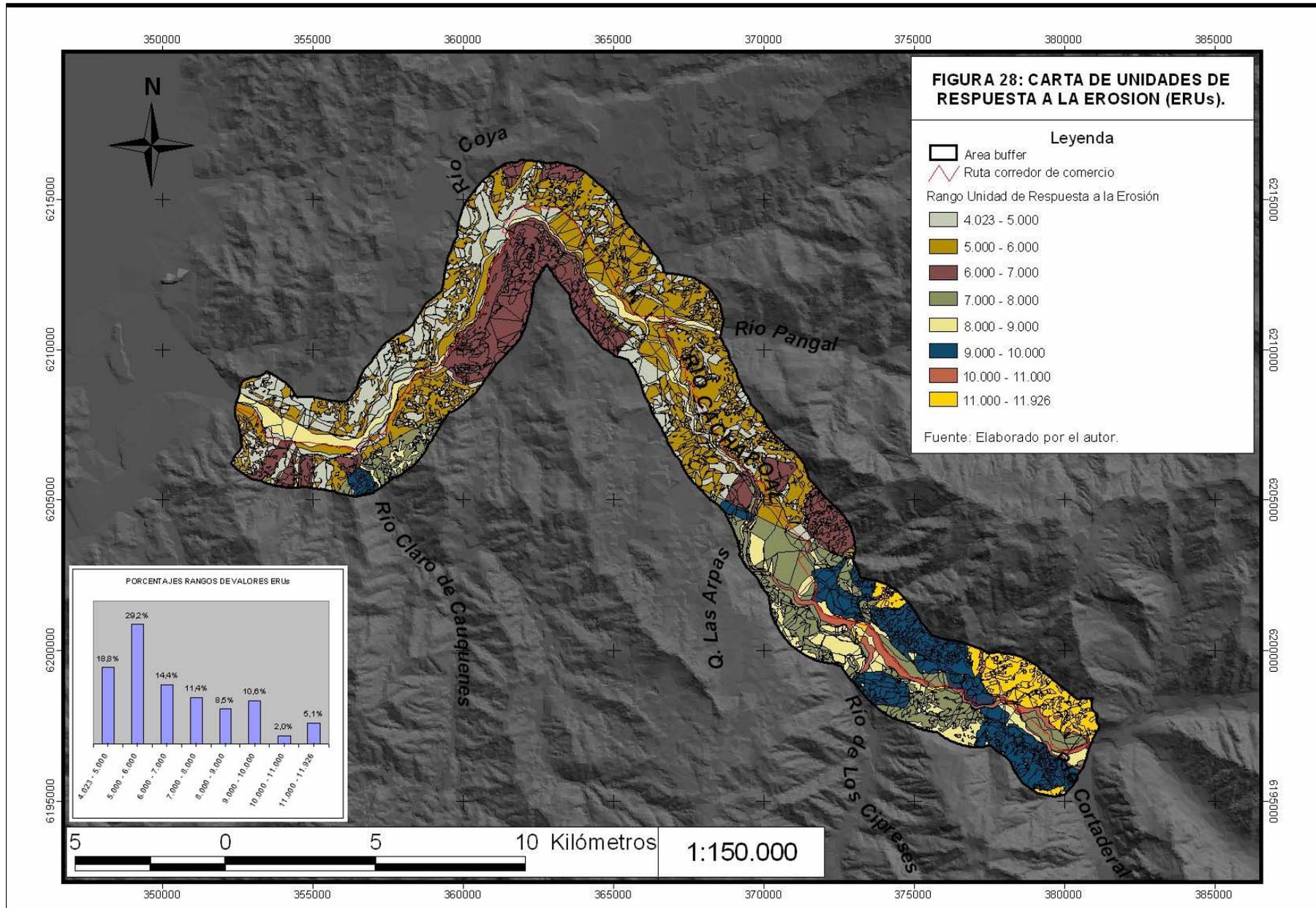
Fuente: Elaborado por el autor.

El valor de inconsistencia calculado por el software EXPERT CHOICE fue de 0,022, por lo tanto la estructura jerárquica y los pesos de las variables tienen una lógica que es aceptable con respecto al objetivo planteado, pues no superan el valor 0,1 lo cual, según SATTY *et al.* (1991), indicaría inconsistencia del modelo.

#### **4.3.2 Determinación de ERUs en el Área**

A partir de la ponderación total de variables y la consecuente asignación de los pesos correspondientes para cada cobertura temática de información, fue posible determinar, mediante superposición cartográfica, las Unidades de Respuesta a la Erosión (ERUs) para el valle de baja, media y un sector de alta montaña del río Cachapoal. En este sentido, con la finalidad de simplificar el análisis, se realizó un *buffer* entorno a la ruta del corredor de comercio Las Leñas, cuyo ancho es de tres kilómetros (FIG.28).

El total de combinaciones ERUs resultantes para el área de estudio fue de 541, cuyos valores fluctúan entre 4.023 y 11.926 (Anexo 2). Al realizar un análisis espacial de estas combinaciones por tramos, el que posee la mayor distribución va entre 5.000 y 6.000 con el 29,2%, localizado principalmente en el flanco de valle norte de baja y media montaña, entre el río Coya y la quebrada Las Arpas. El rango ERUs entre 4.023 y 5.000 corresponde al 18,8% del territorio, y se ubica en la ribera norte de baja montaña, seguido del tramo entre 6.000 y 7.000 con el 14,4%, distribuido en el flanco de valle sur de baja montaña. Paralelamente, la alta montaña concentra las combinaciones ERUs con los mayores valores, siendo los tramos predominantes los que fluctúan entre 7.000 y 8.000 (11,4%) en fondo de valle, y el rango que va desde 9.000 a 10.000 (10,6%) asociado a los sistemas de vertientes.



#### 4.4 SUSCEPTIBILIDAD EROSIVA PARA EL AREA DE ESTUDIO

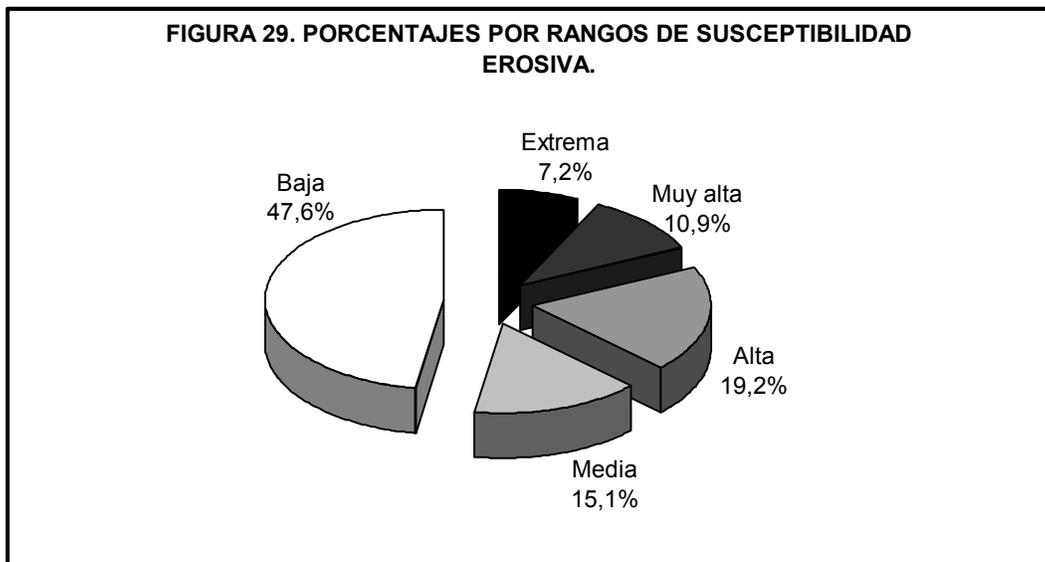
Al reclasificar las ERUs, según las categorías utilizadas por MÄRKER *et al.* (2001), en las cuencas de África del sur, fue posible determinar la susceptibilidad erosiva entorno al corredor de comercio Las Leñas en el área de estudio. Estas unidades se agruparon en cinco categorías, las que poseen igual cantidad de combinaciones (Tabla 27).

**TABLA 27: CATEGORIAS DE SUSCEPTIBILIDAD EROSIVA PARA EL AREA DE ESTUDIO.**

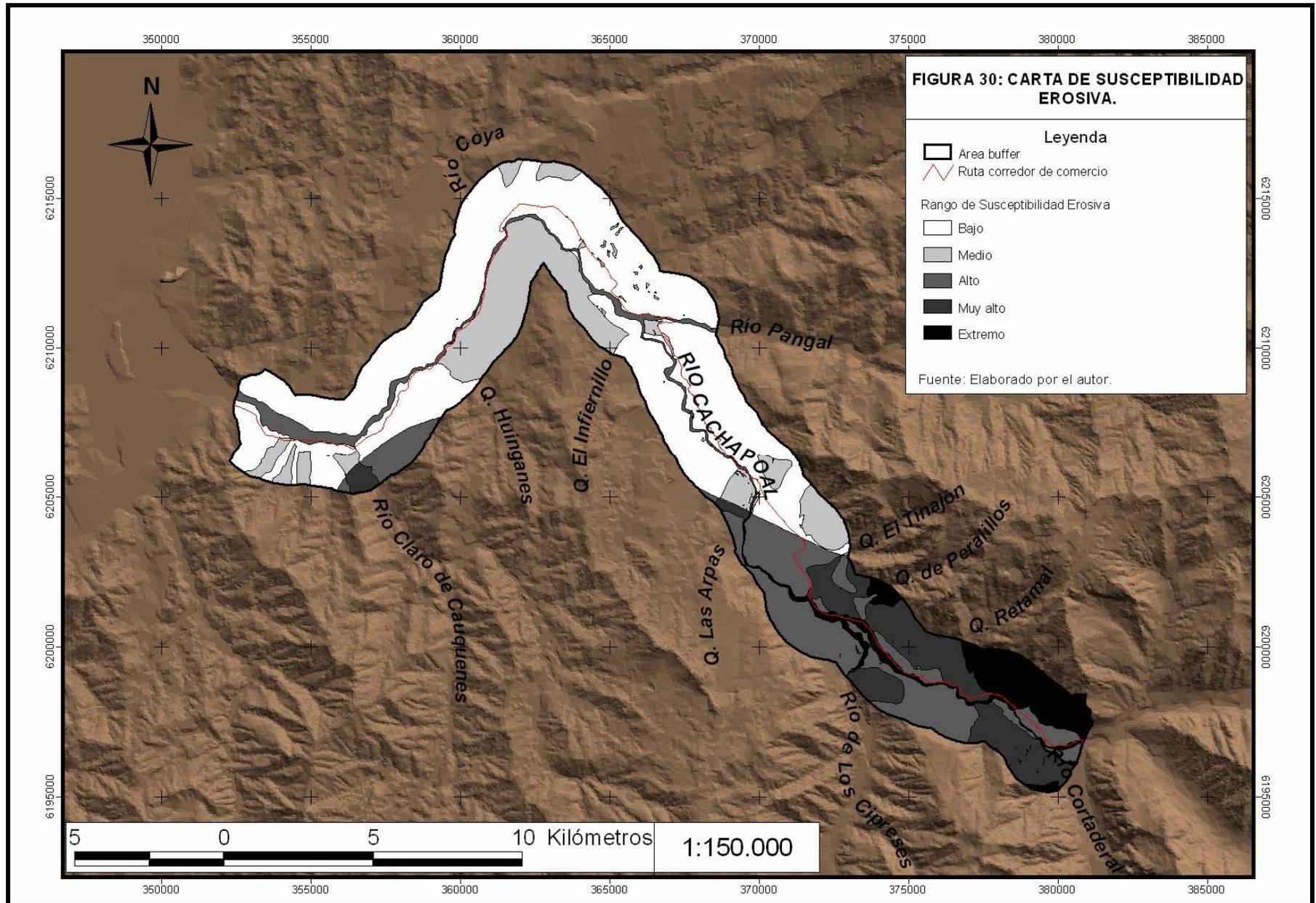
Combinaciones ERUs Reclasificadas	Susceptibilidad a la Erosión
4.023 – 5.603	Baja
5.604 – 7.184	Media
7.185 – 8.764	Alta
8.765 – 10.345	Muy alta
10.346 – 11.926	Extrema

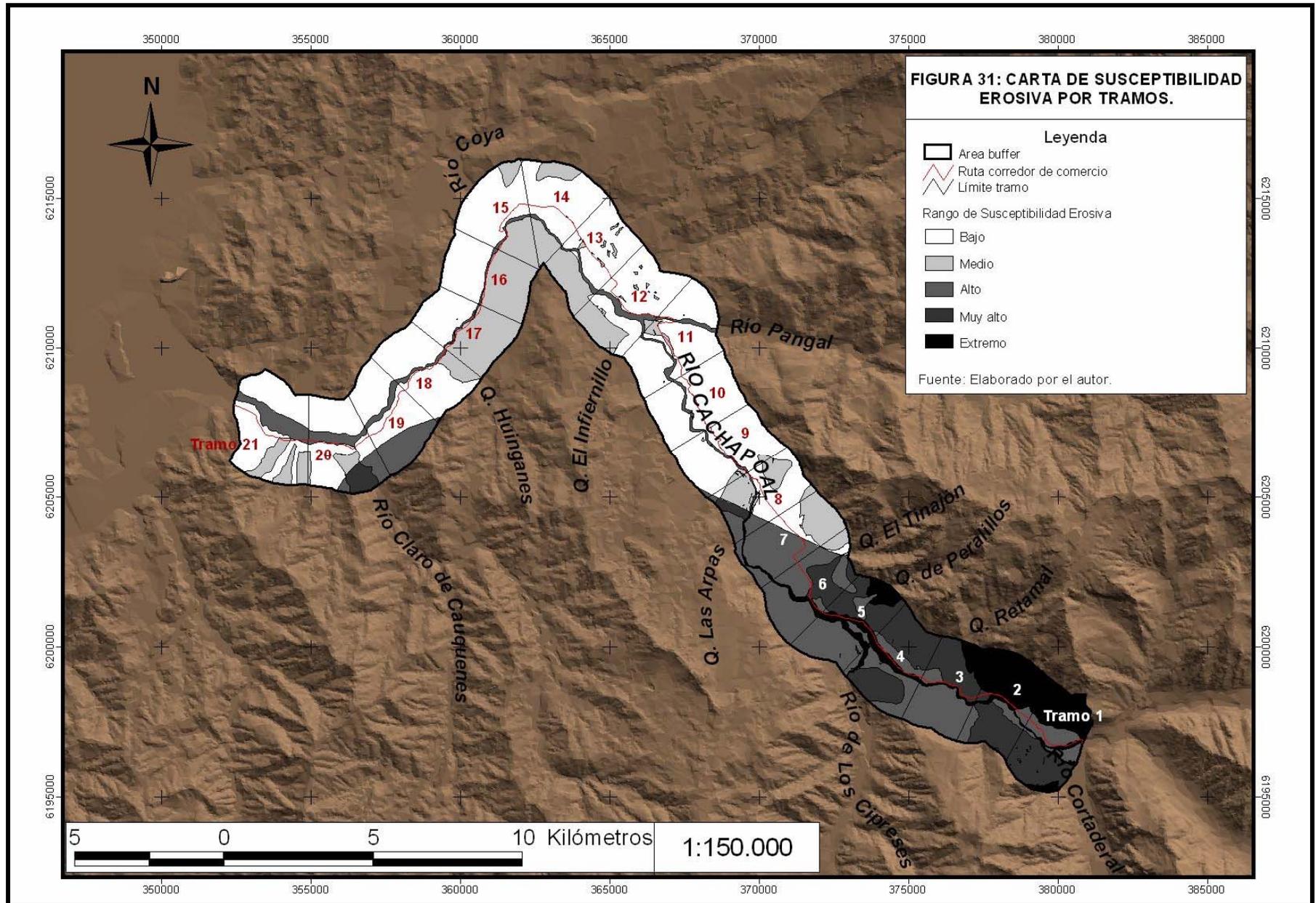
Fuente: Elaborado por el autor a partir de MÄRKER *et al.* (2001).

Las FIG.29 y 30 representan la distribución espacial de la susceptibilidad erosiva en el área entorno al corredor (132,4 km<sup>2</sup>). En este sentido, el 47,6% de la superficie tiene un *bajo* potencial erosivo (63 km<sup>2</sup>), concentrado en baja y media montaña, donde también hay sectores de categoría *media* con el 15,1% (20 km<sup>2</sup>). Por otra parte, se distingue que los mayores niveles de susceptibilidad están agrupados principalmente en el sector de alta montaña (49,4 km<sup>2</sup> con el 37,3%), predominando la categoría *alta* que posee el 19,2%. Esta situación es el resultado de la interacción entre la erosión presente y los factores físico-naturales, que ha generado una marcada sectorización.

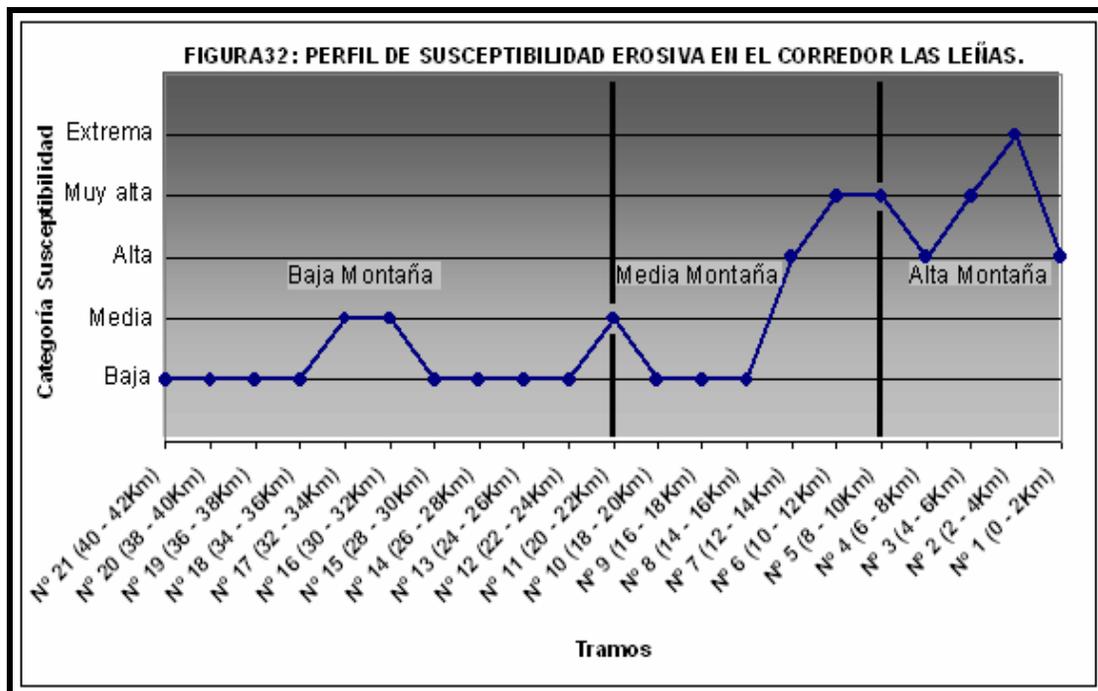


Fuente: Elaborado por el autor.





La división del área en tramos de análisis de dos kilómetros de largo (FIG.31), facilitó la determinación de la susceptibilidad erosiva, identificando el perfil esquemático general de la misma (FIG.32).



Fuente: Elaborado por el autor.

Entre los *tramos 1 a 7* queda en evidencia la tendencia al aumento en las categorías de la susceptibilidad erosiva desde la media hacia la alta montaña, fundamentalmente por la alta erosividad pluvial. El ambiente en el que extiende el corredor en este sector es de influencia estructural, asociado a la formación Farellones, con superficies rocosas en vertientes muy escarpadas, donde se producen desprendimientos de material en conos coluviales, flujos de barro o detritos en conos aluviales y cárcavas en terrazas fluviales.

A partir del *tramo 7*, de susceptibilidad erosiva alta en una terraza fluvial con cárcavas medias y profundas, se produce un descenso generalizado en los niveles de los tramos hasta el río Pangal, por la disminución en la erosividad pluvial y de la intensidad erosiva existente, esto último se debe principalmente a la estabilización que genera la cobertura vegetal sobre las laderas en media montaña.

El sector que va entre los *tramos 11 y 21*, inserto en un ambiente de baja montaña, con vertientes de estructura monoclinas que pertenecen a la formación Coya – Machalí, la constante alrededor del corredor sigue siendo la baja susceptibilidad, principalmente en el flanco de valle norte. Sin embargo, fue posible identificar sectores que presentaron categoría media entorno al río Pangal, como también entre la quebrada El Infiernillo y el estero Huinganes, en el flanco sur.

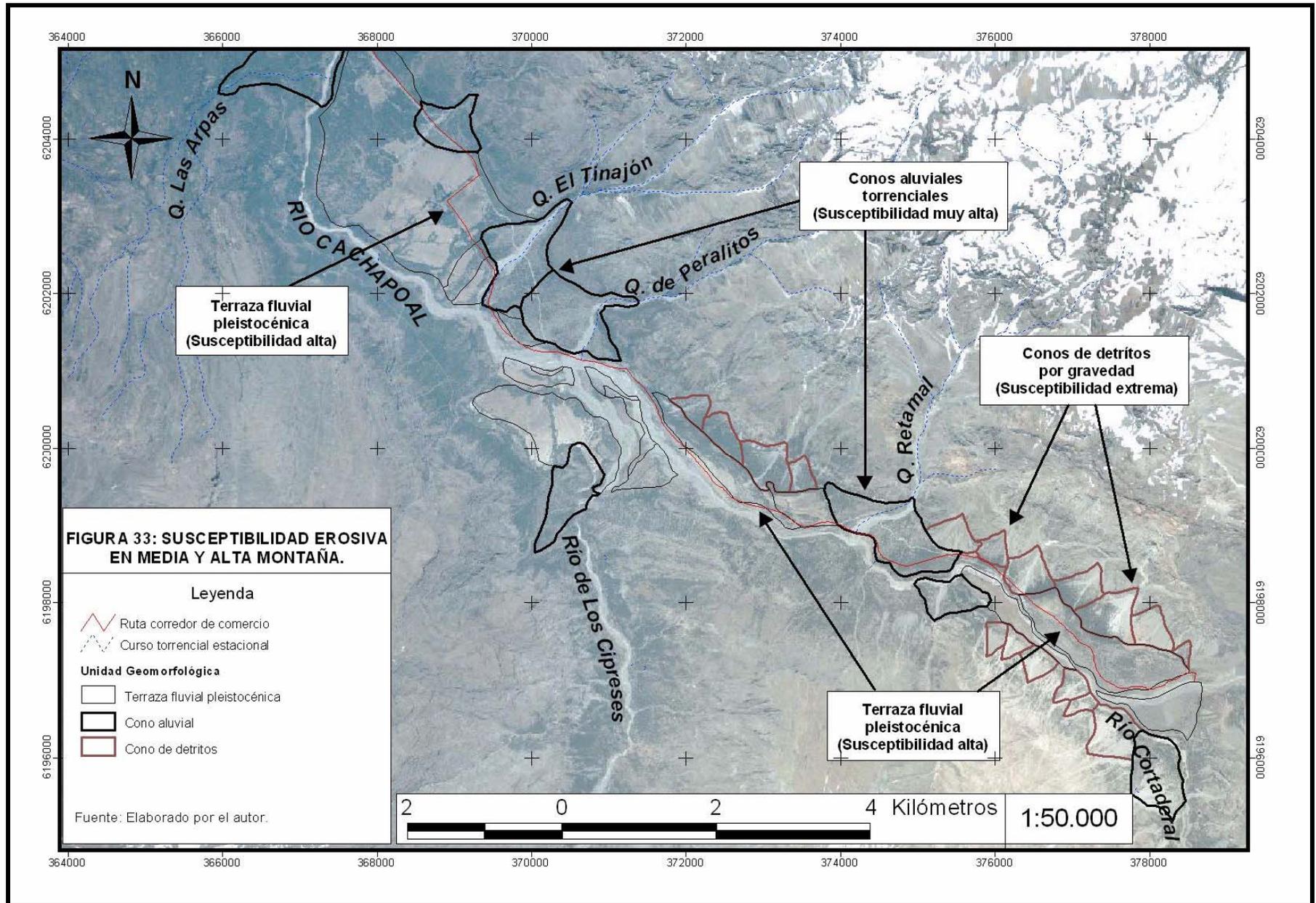
Así, desde el río Cortaderal hasta la quebrada de Las Arpas está ubicado el sector que agrupa los mayores niveles de susceptibilidad erosiva (FIG.33). El *tramo 1* posee una categoría alta, en la terraza fluvial pleistocénica baja entorno a la confluencia de los ríos Cortaderal y Las Leñas, pues las cárcavas de poca y mediana profundidad en suelos de textura areno francosa allí existentes, provocan una tendencia al desarrollo de erosión lineal más profunda como resultado de la gran agresividad pluvial. Luego sigue el *tramo 2* en vertientes con caras libres rugosas escarpadas de rocas intrusivas graníticas, cuya susceptibilidad erosiva extrema se debe a desprendimientos y flujos de materiales que han formado conos de detritos por gravedad. El *tramo 3* de susceptibilidad muy alta está asociado al cono aluvial de la quebrada Retamal, el que posee un lecho torrencial de carácter estacional (flujos) pues se activa durante las precipitaciones invernales y los deshielos primaverales; al igual que los *tramos 5* y *6* de susceptibilidad erosiva muy alta, asociados a las quebradas de Peralitos y El Tinajón, respectivamente.

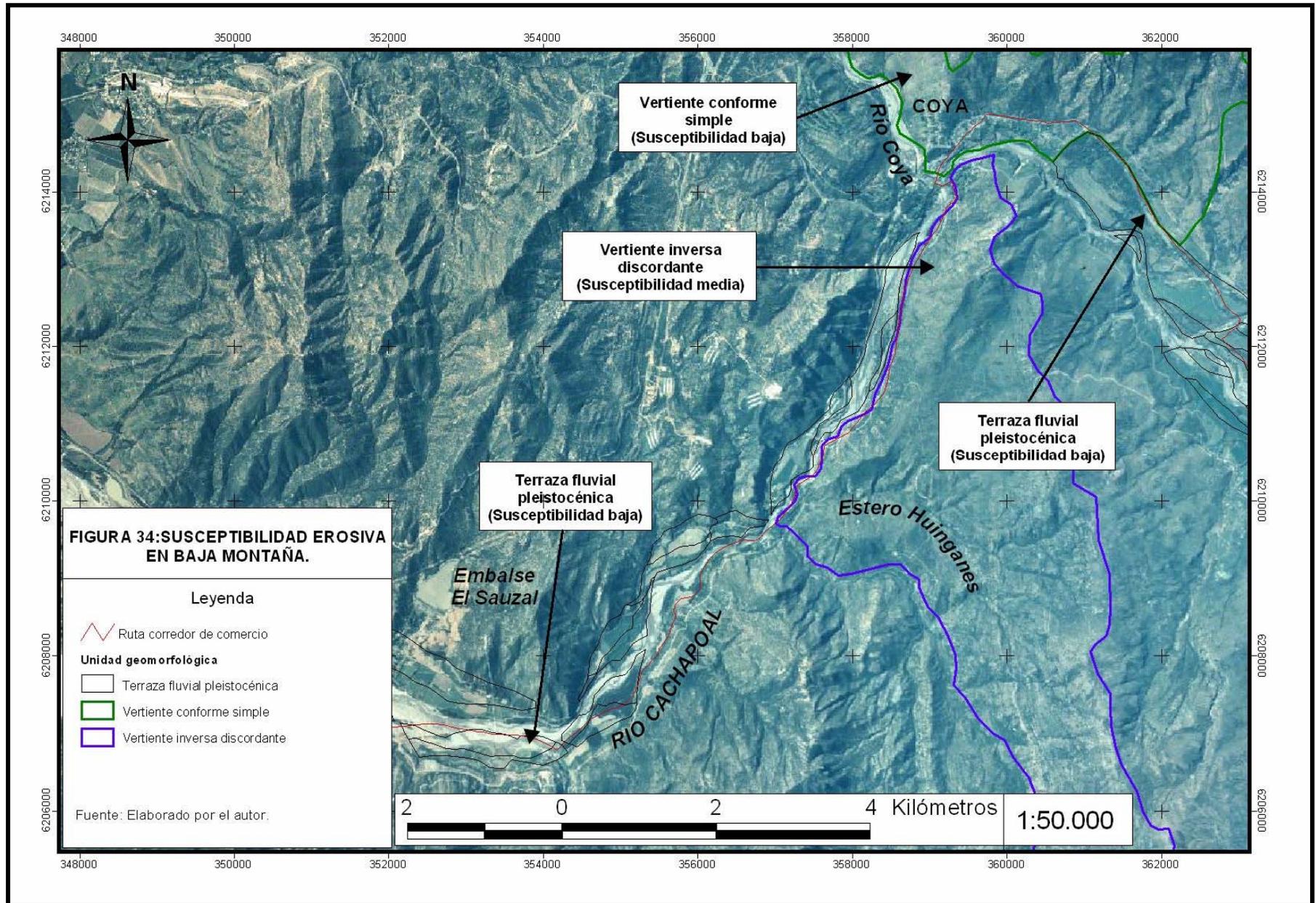
Entre los *tramos 8* y *10* la susceptibilidad erosiva es baja, en vertientes de estructura concordante pertenecientes a la formación Farallones, que a pesar de estar ubicadas a barlovento y tener una fuerte pendiente, se encuentran estabilizadas por una cubierta vegetal de matorral subandino, que provoca un dinamismo menor en comparación a las vertientes de cara libre en alta montaña. Sin embargo, en el *tramo 11* la categoría es media por la existencia de cárcavas con profundidad media en suelos de textura franco arenosa, que favorecen el posterior desarrollo de erosión lineal en terrazas fluviales de la confluencia de los ríos Cachapoal y Pangal.

En los *tramos 12* y *13* predomina la baja susceptibilidad, por la estabilización vegetal en amplias terrazas fluviales medias de textura franco arenosa. Posteriormente, los *tramos 14* y *15* también poseen categoría baja correspondiente a vertientes conformes de la formación geológica Coya – Machalí, con pendientes fuertes a sotavento, estabilizadas por matorral de tipo esclerófilo. Por el contrario, la susceptibilidad erosiva es media en los *tramos 16* y *17*, debido al eventual desarrollo de cárcavas profundas y el aporte de materiales desde vertientes inversas escarpadas expuestas a barlovento. Entre los *tramos 18* y *21* reaparece la categoría baja en las terrazas fluviales pleistocénicas bajas de suelos con textura areno francosa, entorno a la desembocadura del río Claro de Cauquenes, pues los procesos erosivos existentes son de intensidad ligera (FIG.34).

Además, con respecto a los niveles de terrazas aluviales, los escarpes están expuestos a la disección del río Cachapoal a través del socavamiento lateral, lo cual favorece el retroceso de las terrazas, identificándose dos sectores de susceptibilidad en el lecho. El primero va desde el *tramo 1* al *tramo 7* y es de categoría extrema, dado el carácter torrencial de este curso en invierno y primavera. El otro tiene susceptibilidad alta a partir del *tramo 8*, por la disminución en la agresividad pluvial con respecto a la zona anterior.

Fue posible determinar que la susceptibilidad erosiva dentro del valle del río Cachapoal, por donde se extiende la ruta del corredor Las Leñas, va disminuyendo desde la alta hacia la baja montaña, condición determinada fundamentalmente por la distribución de la erosividad pluvial, de los procesos erosivos existentes y la topografía.





## **CAPITULO 5. DISCUSION**

La importancia de la interacción entre los factores del medio natural sobre el modelado superficial, desde el punto de vista morfodinámico descrito por TRICART *et al.* (1982), fue ratificado en relación al ordenamiento espacial que tienen los procesos y los niveles de susceptibilidad erosiva en el paisaje de este valle, lo cual responde al principio de intercambio de energía y materia entre los elementos del medioambiente, considerado como un sistema que tiende al equilibrio, ya que existen diferencias morfoestructurales, topográficas, climáticas y litológicas.

En este sentido, tal como fue planteado por MÄRKER *et al.* (2001), la incorporación de conceptos como las áreas homogéneas, son relevantes en el análisis de dinámicas erosivas actuales y potenciales, capaces de integrar aspectos físico – naturales. Se reconoce el papel de estos fenómenos en diferentes escalas espaciales, entre flujos precanalizados y formas de gran potencia. No obstante las cárcavas y los movimientos en masa son escasamente considerados en modelos tradicionales como el USLE o el RUSLE, los que no fueron diseñados para ser aplicados en cuencas de gran tamaño, entregando a las ERUs un grado de precisión superior en cuanto a la distribución de los procesos degradacionales en estos paisajes. Además, la incorporación de la erosión actual en el análisis como una capa de información, permite contrastar la geodinámica a través del tiempo.

El dinamismo de los ambientes montañosos favorece el desarrollo de procesos erosivos distribuidos según la sección altitudinal. Esto se confirma a través de los planteamientos de CASTRO *et al.*, (2003), donde los diferentes niveles son considerados en función de las condiciones ambientales, siendo los aspectos morfológicos de mayor importancia que los altimétricos, generando así territorios diferenciados. En relación a lo anterior, considerando también las apreciaciones de ARAYA – VERGARA (1985), fue posible apreciar que la degradación actual en la alta montaña del área estudiada, responde principalmente a procesos asociados a vertientes estructurales que aportan materiales desde las paredes rocosas, elaborando formas basales que efectivamente, según lo planteado por BLIKRA *et al.* (1998), se relacionan a procesos de remoción en masa como la caída y el flujo de détritós. Por el contrario, el modelado exógeno es la causa de la geodinámica presente en los paisajes de baja y media montaña en el valle del río Cachapoal, que obedece fundamentalmente a la vegetación ubicada por debajo del *timberline*, como señala ARNAEZ – VADILLO en GARCIA – RUIZ (1990), la cual ha estabilizado las vertientes monoclinales que desarrollan erosión de tipo lineal.

De igual manera, la dinámica actual de las formas depositacionales, como fue descrito por SOTO *et al.* (2004), debe ser comprendida en el contexto altitudinal. Las diferencias entre los ambientes de montaña en el área, están asociadas al tipo y la dinámica de formas basales y sus estados relativos de estabilización, los que varían entre aquellos depósitos ubicados en el periglacial de altura y los pisos templados de baja y media montaña. Así también, se ratificó la relación entre el balance positivo de erosión de un río y la evacuación de materiales en un sector (alta montaña), como el balance negativo y la sedimentación en forma de terrazas en otro sector del valle (baja y media montaña), según lo planteado por TRICART (1977) en ARAYA – VERGARA (1985).

Tal como señaló MÄRKER *et al.* (2001), el proceso de erosión en el paisaje montañoso está controlado por una serie de variables que relacionan el clima, las condiciones edafológicas, la topografía y la litología. De todas ellas, la precipitación actúa de forma activa incorporando energía en el sistema, provocando escurrimiento superficial. Frente a este factor el suelo y las formaciones geológicas presentan una mayor o menor resistencia, mientras que la topografía es el amplificador o retardador del proceso. Igualmente, como plantea SOTO *et al.* (2004), aspectos tales como la conformación litológica, la posición altimétrica y la geoecológica de las secciones de alta y media montaña permitieron comprender los procesos geodinámicos. Las observaciones de FERRANDO (1992) en referencia a clasificar los factores físico – naturales entre los de erosividad y erodabilidad, fueron utilizadas para diferenciar y explicar las relaciones entre los mismos.

En esta investigación, fue posible identificar áreas territoriales que responden de igual manera en función a la erosión (ERUs), siendo la base para la determinación de las diferentes categorías de susceptibilidad, confirmando así las apreciaciones de PEÑA (1997), con respecto a la valorización de la erosión superficial en el reconocimiento de zonas potencialmente inestables mediante superposición cartográfica de variables, lo cual debe ser precedido por un análisis jerarquizado, manera racional y útil de organizar los elementos del medio, tal como lo definió SAATY *et al.* (1991), pues permite entregar un carácter cuantitativo a cada variable.

Los niveles de susceptibilidad erosiva y su distribución espacial en el valle del río Cachapoal, según los diferentes pisos altitudinales, pueden ser correlacionados con ciertos patrones geodinámicos descritos para esta área en trabajos anteriores. Es así, como la agrupación de los mayores niveles de susceptibilidad en alta montaña y los menores niveles en la baja y la media montaña, se asocian con las clasificaciones de CASTRO *et al.* (2003), para el ordenamiento de las categorías de riesgo natural, que precisamente se deben a la condición estabilizadora de la vegetación y la dinámica de las vertientes. Por otra parte, respecto a los resultados obtenidos por CHAVEZ (2005) y CUETO (2001), la expresión espacial de los deslizamientos y los derrumbes, entorno al corredor de comercio Las Leñas, también evidencian que es el tramo de alta montaña el más amenazado por los procesos de erosión.

Finalmente, las implicancias que tienen los resultados para el proyecto de corredor de comercio Las Leñas, radica en que estos sirven de base para la planificación de la ruta. Las diferencias en las condiciones degradacionales entre baja, media y alta montaña, se debe traducir en un diseño del corredor acorde a las características geodinámicas de cada piso altitudinal, pues aquellas áreas con mayor potencialidad a la erosión pueden generar dificultades para el funcionamiento de esta ruta, lo que se traduce en costos marginales elevados, comparado a los sectores relativamente más estables. Así, la elaboración de la carta de susceptibilidad erosiva para el valle del río Cachapoal, debe ser utilizada como insumo de información e instrumento eficaz en la planificación del corredor Las Leñas en función de estos fenómenos naturales, y eventualmente para la implementación de medidas de mitigación. En este sentido, entre el río Coya y la ciudad de Rancagua, de acuerdo al MOP (2004), el camino ha sido mejorado cambiando de ripio a asfalto, además de la protección de taludes y las defensas en riberas.

## **CAPITULO 6. CONCLUSIONES**

En los ambientes montañosos la erosión y la remoción en masa son el resultado de la interacción entre los elementos físico – naturales, donde los procesos dinamizadores del sistema, como la degradación actual y la agresividad pluvial, son características relevantes al momento de evaluar y cuantificar estos fenómenos, pues evidencian ciertos patrones en el ordenamiento espacial claramente identificables entre los pisos altitudinales, donde la topografía y las características de los materiales actúan como receptores activos en esta dinámica. Es así, que la erosión no es solo un hecho de carácter multivariado, pues tiene una dimensión territorial en virtud de la cual se debe entender como un sistema que genera relaciones de interdependencia.

En este sentido, con respecto a la hipótesis, no solo se confirma que existen diferencias de tipos e intensidades erosivas entre las formas del paisaje en ambientes montañosos de influencia estructural, sino que en vertientes, formas basales y terrazas fluviales, la degradación también varía según los pisos altitudinales, identificándose dos sectores. Uno localizado en alta montaña, donde la dominancia de vertientes rocosas, la elevada erosividad pluvial y las pendientes escarpadas implican una mayor detritificación y aporte de materiales que generan taludes, conos aluviales y por ende movimientos en masa. En el otro sector, en baja y media montaña, las vertientes y las formas basales de contacto tienen una cobertura vegetal estabilizadora, además aparecen las terrazas fluviales en fondo de valle, todo lo cual se asocia a erosión lineal.

Los niveles de susceptibilidad a la erosión en el valle cordillerano del río Cachapoal, por donde se extiende el corredor de comercio Las Leñas, fluctúan entre bajo y extremo, los que son consecuentes con las características de la geodinámica actual, como también a las propiedades físico – naturales consideradas, aumentando sistemáticamente desde baja a alta montaña, siendo este último piso el que concentra los mayores niveles pues en la medida que se producen cambios altitudinales, vegetacionales, de la erosividad y de las características del terreno, la potencialidad erosiva también varía. Paralelamente, el flanco de valle sur posee los menores niveles de susceptibilidad a desarrollar este tipo de fenómenos en comparación al lado norte, donde está proyectada la ruta, aunque los últimos doce kilómetros del corredor están en la ribera sur.

De esta manera, las áreas de mayor peligro para el corredor de comercio Las Leñas se localizan principalmente en alta montaña, debido a las formas basales representativas de la geodinámica de estos paisajes, las que se asocian a movimientos del terreno en masa, por lo cual es necesario implementar obras que eviten el impacto de estos eventos en puntos críticos como las quebradas de Retamal, Peralitos y El Tinajón, donde los lechos torrenciales son de carácter estacional por el régimen pluvio – nival de las precipitaciones. En baja y media montaña el menor peligro se debe a la estabilidad que proporciona la vegetación de bosque y matorral esclerófilo, principalmente en vertientes donde los estratos rocosos solo afloran en las partes culminantes, a lo cual se debe agregar la ausencia de formas de contacto entre laderas y fondo de valle en baja montaña, por lo cual la intensidad de la erosión disminuye dando paso a canales y cárcavas, es decir erosión de tipo lineal.

En términos generales, la metodología propuesta por MÄRKER *et al.* (1999), es de gran flexibilidad, pues las variables consideradas dependen de las características y el tipo de escenario que será analizado. Así, la única manera de obtener una idea concluyente del carácter relativamente frágil de un área desde el punto de vista erosivo, es mediante la estructuración de un método capas de contrastar los componentes del terreno donde la erosión se está produciendo. De esta manera, conceptos como erosión actual y erosión potencial, generalmente considerados como excluyentes entre sí, son integrados en las ERUs, transformándolas en entidades de carácter temporo – espacial.

Considerando las expectativas que esta metodología presenta, es decir la obtención de erosión actual (ERefUs) y potencial, se puede decir que tiene un enfoque mixto donde se tratan aspectos diversos, lo que supone un paso más hacia una concepción global y completa de la erosión.

Los resultados de este estudio demuestran que la identificación de áreas homogéneas de respuesta erosiva, utilizando a las ERUs como base conceptual, proporcionan la información necesaria para determinar los niveles de susceptibilidad y su distribución espacial en ambientes montañosos. Así, el modelado de este tipo de procesos, es decir la simulación de lo que puede suceder a través de cartografía, debe ser considerado como instrumento útil en la toma de decisiones y la planificación territorial dentro de estos paisajes, como es la implementación de rutas de comercio a través del sistema cordillerano de Chile central.

## **BIBLIOGRAFIA**

1. ARAYA – VERGARA, J.F. & BORGEL 1972. “**Definición de Parámetros para Establecer un Banco Nacional de Riesgos y Amenazas Naturales. Criterios para su Diseño**”. ONEMI/PNUD Uchile/92/009/A. Chile. Pp. 219.
2. ARAYA – VERGARA, J.F. 1985. “**Análisis de la Carta Geomorfológica de la Cuenca del Mapocho**”. Revista Informaciones Geográficas, N° 32, Universidad de Chile. Santiago, Chile. Pp. 31 – 44.
3. ARAYA – VERGARA, J.F. 1996. “**Primera Experiencia con una Clasificación Dinámica de Vertientes de Montaña**”. I Taller Internacional de Geoecología de Montaña y Desarrollo Sustentable de los Andes del Sur. Universidad de Chile, Departamento de Geografía; The United Nations University. Viña del Mar, Chile. Octubre – Noviembre 1991. Pp. 389 – 400.
4. ARAYA – VERGARA, J.F. 2001. “**Apuntes Cátedra de Geomorfología**”. Escuela de Geografía, Universidad de Chile. Santiago, Chile.
5. ALONSO C. & MORENO V. 1996. “**Análisis Multitemporal de Imágenes LANSAT TM en la Cartografía de las Masas de Hielo y Nieve Aplicada a la Modelización Hidrológica**”. Revista Teledetección N° 7. España. Pp. 12.
6. BLIKRA, L.H. & NEMEC W. 1998. “**Postglacial Colluvium in Wester Norway: Depositional Processes, Facies and Paleoclimatic record**”. Sedimentology 45, International Association of Sedimentologist. Noruega. Pp. 909 – 959.
7. BUTTERWORTH R., CUNNINGHAM R. B., GREENE R. S. B., HERRON N. F. & WILSON C. J. 2000. “**Geomorphic Controls on the Physical and Hydrologic Properties of Soils in Valley Floor**”. Earth Surface Processes and Landforms – Earth Surf. Process. Landforms 25. Nueva Gales del Sur, Australia. Pp. 1161 – 1179.
8. CASTRO, C.; CERECEDA, P. & BRIGNARDELLO, L. 1995. “**Determinación de Áreas de Riesgo Morfodinámico de San Juan Bautista, Isla de Robinson Crusoe**”. Revista Geográfica Terra Australis 40. Santiago, Chile. Pp. 43 – 61.
9. CASTRO, C. SOTO, M.V. & CHAVEZ, C 2003. “**Aporte Moderno de Masa y su Implicancia en la Definición de Niveles de Riesgos Naturales**”. Revista Tiempo y Espacio, N° 13, Departamento Ciencias Sociales, Universidad del Bío – Bío. Chillán, Chile. Pp. 185 – 199.
10. CHARRIER, R. 1983. “**Carta Geológica de Chile**”. Hoja Teniente 1:250.000. Datos Publicación Universidad de Chile. Santiago, Chile. Pp. 155.
11. CHAVEZ, C. 2005. “**Amenazas Naturales en Media y Baja Montaña Asociadas al Corredor de Comercio Las Leñas, VI Región del Libertador Bernardo O’higgins**”. Memoria de Título. Escuela de Geografía, Universidad de Chile. Santiago, Chile. Pp. 104.
12. CHUVIECO, E. 2002. “**Teledetección Ambiental. La Observación de la Tierra desde el Espacio**”. Ediciones Ariel. Barcelona, España. Pp. 586.
13. CENTRO DE INFORMACION DE RECURSOS NATURALES (CIREN). 1996. “**Estudio Agrológico. Descripciones de Suelos. Materiales y Símbolos. VI Región**”. Santiago, Chile. Publicación 114. Pp. 505 – 521.
14. COMISIÓN NACIONAL DEL MEDIO AMBIENTE (CONAMA). 1994. “**Manual de Evaluación de Impacto Ambiental: Conceptos y Antecedentes Básicos**”. Alfabet Impresores. Santiago, Chile.

15. CRUDEN, D & VARNES, D. 1996. "**Lanslides Types and Processes. In Landslides: Investigation and Mitigation**". Transportation Research Board, National Research Council, Special Report N° 247. Washington D.C., E.E.U.U.
16. CUETO, S. 2001. "**Evaluación y Priorización de Corredores de Comercio Alternativos al Sistema Cristo Redentor**". Memoria Para Optar al Titulo de Geógrafo. Universidad de Chile. Santiago, Chile. Pp. 82.
17. DE PEDRAZA, J. 1996. "**Geomorfología. Principios, Metodología y Aplicaciones**". Editorial Rueda. Madrid, España. Pp. 369 – 387.
18. FERRANDO, F. 1992. "**Bases Para la Confección de Cartas de Erodabilidad**". Anales de la Sociedad Chilena de Ciencias Geográficas, Universidad de Talca. Pp. 8.
19. FERRANDO, F. 1996. "**Nivel de Erosividad de las Unidades Hidroespaciales en la XII Región de Magallanes y de la Antártica Chilena**". Revista Geográfica de Chile Terra Australis, N° 41. Santiago, Chile. Pp. 49 – 68.
20. GARCÍA RUIZ J.M. 1990. "**Geoecología de las Áreas de Montaña**". Geoforma Ediciones. Logroño, España. Pp. 337.
21. GOMEZ OREA, D. 1994. "**Ordenación del Territorio: Una Aproximación desde el Medio Físico**". Capitulo III. Instituto Tecnológico Geominero de España. Editorial Agrícola Española, S.A. Madrid, España. Pp. 59 – 139.
22. GONZALEZ G., ORTIGOSA L., MARTI C. & GARCIA – RUIZ J.M. 1995. "**The Study of the Spatial Organization of Geomorphic Processes in Mountain Areas Using GIS**". Mountain Research and Development. Vol.15, N° 3. España. Pp. 241 – 249.
23. GOUDIE A., 1989. "**The Nature of the Environment**". Second Edition. Basil Blackwell. Great Britain. Pp. 388.
24. HAMBLIN, W. KENNETH. 1992. "**Earth's Dynamic Systems**". Sixth Edition. New York, EE.UU. Capitulo 11. Pp. 528.
25. HAUSER, A. 1993. "**Remociones en Masa en Chile**". Servicio Nacional de Geología y Minería", Boletín N° 45. Santiago, Chile. Pp. 76.
26. INSTITUTO GEOGRAFICO MILITAR (IGM). 1985. "**Geografía de los Climas. Tomo XI**". Santiago, Chile. Pp. 243.
27. JAQUE CASTILLO, E. 1995. "**Los Factores Geográficos en los Procesos de Derrumbe y Deslizamiento. Discusión Bibliográfica**". Revista Geográfica de Chile Terra Australis 40, Centro EULA, Universidad de Concepción. Santiago, Chile. Pp. 31 – 42.
28. KLOHN, C. 1960. "**Geología de la Cordillera de los Andes de Chile Central. Provincias de Santiago, O'Higgins, Colchagua y Curicó**". Instituto de Investigaciones Geológicas. Boletín N° 8. Santiago, Chile. Pp. 95.
29. KUHNI A. & PFIFFNER O.A. 2001. "**Drainaje Patterns and Tectonic Forcing: A model Study for the Swiss Alps**". Geologisches Institute, Universitat Bern. Basin Research, Volume 13, Issue 2. Bern, Switzerland. Pp. 169 – 197.

30. MÄRKER M., MORETTI S. & RODOLFI G. 2001. “**Integrated Water Resources Management System**”, Capítulo “**Assessment of Water Erosion Processes and Dynamics in Semi-arid Regions of Southern Africa (kwazulu / Natal, RSA, and Swaziland) Using the Erosion Response Units Concept (ERU)**”. Revista Geogr. Fis. Dinam. Quat. Vol. 24. Issue 1. Florencia, Italia. Pp. 71 – 84.
31. MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS, DIRECCION GENERAL DE AGUAS (MOP – DGA). 1987. “**Balance Hídrico de Chile**”. Mapa Santiago, Escala 1:500.000, Lámina N° 20. Santiago, Chile.
32. MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS, DIRECCION DE VIALIDAD (MOP). 2004. “Mira Como Progresa Chile”. Informativos Regionales Vialidad. Región del Libertador General Bernardo O’Higgins. Pp. 4.
33. MORGAN, R.P.C. 1997. “**Erosión y Conservación del Suelo**”. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España. Pp. 343.
34. PEÑA MONNE, J. 1997. “**Cartografía Geomorfológica Básica y Aplicada**”. Geforma Ediciones. Logroño, España. Pp. 227.
35. QUINTANILLA, V. 1983. “**Biogeografía**”. Tomo III, Capitulo 4. Instituto Geográfico Militar (IGM). Santiago, Chile. Pp. 230.
36. QUINTANILLA, V. 1995. “**Cartografía Ambiental de Ecosistemas Montañosos. Procesos y Riesgos en los Altos Andes de Santiago**”. Vol. I. Primeras Jornadas Platenses de Geografía, Universidad Nacional de La Plata, Facultad de Humanidades y Ciencias de la Educación, Departamento de Geografía. La Plata, Argentina. Pp. 228 - 238.
37. SAATY, T. L. & KEARNS, K. 1991. “**Analytical Planning. The Organization of Systems**”. The Analytic Hierarchy Process Series Vol. IV. RWS Publications. Pittsburgh, PA, EE.UU. Pp. 208.
38. SOTO, M.V. & CASTRO, C. 2003. “**Dinámica de los Sistemas de Vertientes de Alta Montaña, Cuenca del Río Cachapoal, Chile**”. 10° Congreso Geológico Chileno, Universidad de Concepción, Departamento de Ciencias de la Tierra. Concepción, Chile.
39. SOTO, M.V. & CASTRO, C. 2003. “**Geodinámica Moderna de Vertientes Periglaciares de Altura, Alta Montaña de la Cuenca del Río Cachapoal, Chile**”. Presentado a referato a revista Investigaciones Geográficas. Inédito.
40. SOTO, M.V. & CASTRO, C. 2003. “**Morfodinámica Moderna de Vertientes Periglaciares de Alta Montaña, la Cuenca del Río Cachapoal, Chile Central**”. Revista Informaciones Geográficas, N° 37, Universidad de Chile. Santiago, Chile. Pp. 31 – 44.
41. SOTO, M.V., CASTRO, C. & CHAVEZ, C 2004. “**Caracterización Geomorfológica del Corredor de Comercio Las Leñas, Valle del Río Cachapoal, Andes de Chile Central**”. Revista de Geografía Norte Grande, 31. Chile. Pp. 1 – 20.
42. TRICART, J. & KILIAN, J. 1982. “**La Eco-Geografía y La Ordenación del Medio Natural**”. Editorial Anagrama. Barcelona, España. Pp. 288.
43. VEIT, H. 1991. “**Aspectos Geomorfológicos y Pedológicos sobre Cambios Climáticos durante el Cuaternario Superior en el Norte Chico, Chile**”. I Taller Internacional de Geoecológica de Montaña y Desarrollo Sustentable de los Andes del Sur. Universidad de Chile, Departamento de Geografía; The United Nations University. Viña del Mar, Chile. Pp. 43 – 49.

EVALUACION ESPACIAL DE PROCESOS EROSIVOS Y SU INFLUENCIA SOBRE EL  
CORREDOR DE COMERCIO LAS LEÑAS.

44. VERA, W. 1992. "**Suelos, Una Visión Actualizada del Recurso**". Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Publicaciones Misceláneas Agrícolas N° 38, Segunda Edición. Santiago, Chile. Pp. 345.
45. YOUNG, A. 1977. "**Slopes**". Longman Group Limited. London, United Kingdom. Pp. 288.

## **ANEXOS**

### **ANEXO 1. Variaciones Terrazas Aluviales del Río Cachapoal (TH)**

TH-1: Corresponde a suelos de textura superficial *franco arenosa a franco*, planos y bien drenados.

Clase de capacidad de uso	: III s 0
Categoría de riego	: 2s
Erosión actual	: 0
Clase de drenaje	: 5
Aptitud frutal	: C
Aptitud agrícola	: 3

TH-2: Corresponde a suelos de textura superficial *franco arenosa muy fina*, planos, de drenaje moderado y sometidos a inundaciones ocasionales.

Clase de capacidad de uso	: II w 3
Categoría de riego	: 1
Erosión actual	: 0
Clase de drenaje	: 4
Aptitud frutal	: B
Aptitud agrícola	: 2

TH-3: Corresponde a suelos de textura superficial *franco arenosa fina* y *franco arenosa muy fina*, planos, de drenaje moderado y sometidos a inundaciones ocasionales.

Clase de capacidad de uso	: III w 3
Categoría de riego	: 2w
Erosión actual	: 0
Clase de drenaje	: 4
Aptitud frutal	: C
Aptitud agrícola	: 3

TH-4: Corresponde a suelos de textura superficial *franco arenosa muy fina*, planos y de drenaje moderado.

Clase de capacidad de uso	: III s 0
Categoría de riego	: 2s
Erosión actual	: 0
Clase de drenaje	: 4
Aptitud frutal	: C
Aptitud agrícola	: 3

TH-5: Corresponde a suelos de textura superficial *arenosa muy fina*, planos, con ligera profundidad superficial y bien drenados.

Clase de capacidad de uso	: IV s 0
Categoría de riego	: 3s
Erosión actual	: 0
Clase de drenaje	: 5
Aptitud frutal	: D
Aptitud agrícola	: 4

TH-6: Corresponde a suelos de textura superficial *franco arenosa fina* y *franco arenosa*, bien drenados.

Clase de capacidad de uso	: IV s 0
Categoría de riego	: 3s
Erosión actual	: 0
Clase de drenaje	: 5
Aptitud frutal	: D
Aptitud agrícola	: 4

EVALUACION ESPACIAL DE PROCESOS EROSIVOS Y SU INFLUENCIA SOBRE EL  
CORREDOR DE COMERCIO LAS LEÑAS.

TH-7: Corresponde a suelos de textura superficial *franco arenosa*, planos, con ligera pedregosidad superficial, bien drenados y sometidos a inundaciones ocasionales.

Clase de capacidad de uso	: IV s 0
Categoría de riego	: 3s
Erosión actual	: 0
Clase de drenaje	: 5
Aptitud frutal	: D
Aptitud agrícola	: 4

TH-8: Corresponde a suelos de textura superficial *areno francosa*, planos, de drenaje excesivo y sometidos a inundaciones frecuentes.

Clase de capacidad de uso	: IV s 0
Categoría de riego	: 5
Erosión actual	: 0
Clase de drenaje	: 6
Aptitud frutal	: E
Aptitud agrícola	: 4

TH-9: Corresponde a suelos de textura superficial *franco arenosa fina*, planos y drenaje imperfecto.

Clase de capacidad de uso	: III w 3
Categoría de riego	: 3 w
Erosión actual	: 0
Clase de drenaje	: 3
Aptitud frutal	: E
Aptitud agrícola	: 3

TH-10: Corresponde a suelos delgados, planos, con ligera pedregosidad superficial, de drenaje imperfecto y sometidos a inundaciones periódicas.

Clase de capacidad de uso	: IV s 0
Categoría de riego	: 5
Erosión actual	: 0
Clase de drenaje	: 6
Aptitud frutal	: E
Aptitud agrícola	: 4

TH-11: Corresponde a suelos de textura superficial *franco arenosa muy fina*, planos, de drenaje pobre y sometidos a inundaciones.

Clase de capacidad de uso	: IV w 2
Categoría de riego	: 4 w
Erosión actual	: 0
Clase de drenaje	: 2
Aptitud frutal	: E
Aptitud agrícola	: 4

TH-12: Corresponde a suelos de textura superficial *franco arenosa*, planos y de drenaje pobre.

Clase de capacidad de uso	: IV w 2
Categoría de riego	: 4 w
Erosión actual	: 0
Clase de drenaje	: 2
Aptitud frutal	: E
Aptitud agrícola	: 4

EVALUACION ESPACIAL DE PROCESOS EROSIVOS Y SU INFLUENCIA SOBRE EL  
CORREDOR DE COMERCIO LAS LEÑAS.

**ANEXO 2. Valores ERUs en al Area**

Combinaciones N° 1 a N° 50	Combinaciones N° 51 a N° 100	Combinaciones N° 101 a N° 150	Combinaciones N° 151 a N° 200
4023	4828	5244	5784
4132	4835	5245	5789
4151	4839	5247	5812
4182	4840	5259	5859
4260	4863	5286	5862
4272	4868	5287	5909
4310	4873	5294	5910
4322	4878	5297	5912
4371	4889	5325	5940
4381	4890	5336	5951
4421	4891	5337	5990
4431	4896	5353	6001
4464	4903	5364	6101
4471	4906	5365	6129
4499	4931	5370	6151
4522	4941	5391	6179
4523	4946	5398	6207
4542	4956	5403	6224
4549	4969	5414	6252
4551	4981	5415	6257
4591	4989	5428	6265
4592	4996	5441	6300
4601	4997	5448	6302
4620	5006	5453	6307
4629	5014	5456	6328
4641	5017	5481	6335
4657	5024	5491	6345
4670	5031	5506	6373
4674	5042	5519	6378
4676	5047	5531	6385
4683	5059	5556	6423
4684	5067	5562	6428
4691	5074	5564	6441
4702	5088	5569	6446
4707	5092	5584	6456
4711	5097	5592	6491
4719	5109	5611	6496
4722	5116	5612	6506
4750	5117	5634	6519
4752	5125	5640	6546
4757	5145	5642	6547
4761	5166	5661	6564
4762	5175	5690	6574
4769	5195	5692	6592
4778	5208	5703	6597
4785	5209	5720	6624
4795	5216	5731	6642
4811	5219	5770	6647
4812	5236	5781	6667
4823	5237	5782	6675

EVALUACION ESPACIAL DE PROCESOS EROSIVOS Y SU INFLUENCIA SOBRE EL  
CORREDOR DE COMERCIO LAS LEÑAS.

Combinaciones N° 201 a N° 250	Combinaciones N° 251 a N° 300	Combinaciones N° 301 a N° 350	Combinaciones N° 351 a N° 400
6695	7623	8082	8673
6725	7636	8103	8679
6745	7639	8113	8695
6786	7646	8128	8701
6797	7664	8132	8723
6836	7669	8141	8729
6847	7689	8153	8740
6875	7696	8175	8750
6886	7710	8178	8751
6903	7714	8182	8768
6914	7719	8191	8773
6953	7724	8198	8778
6964	7738	8206	8801
6998	7739	8210	8818
7003	7747	8241	8828
7031	7752	8253	8829
7081	7764	8256	8846
7142	7767	8260	8874
7242	7788	8262	8878
7251	7797	8303	8879
7270	7802	8312	8887
7279	7817	8314	8906
7296	7830	8319	8922
7320	7831	8331	8924
7324	7838	8333	8929
7329	7842	8342	8937
7372	7858	8361	8950
7374	7859	8381	8956
7379	7866	8392	8957
7384	7907	8394	8967
7407	7908	8406	8974
7412	7909	8411	8995
7417	7916	8422	9000
7445	7947	8430	9002
7450	7957	8434	9007
7457	7958	8453	9029
7462	7959	8454	9035
7490	7975	8472	9040
7495	7986	8481	9045
7500	7987	8482	9052
7505	7992	8484	9057
7518	8020	8522	9063
7528	8025	8531	9068
7568	8036	8532	9080
7578	8037	8534	9095
7583	8050	8550	9107
7591	8054	8558	9108
7611	8070	8562	9113
7618	8075	8600	9118
7619	8078	8612	9123

EVALUACION ESPACIAL DE PROCESOS EROSIVOS Y SU INFLUENCIA SOBRE EL  
CORREDOR DE COMERCIO LAS LEÑAS.

Combinaciones N° 401 a N° 450	Combinaciones N° 451 a N° 500	Combinaciones N° 501 a N° 541
9128	9814	11092
9141	9864	11097
9158	9892	11107
9161	9942	11125
9168	10570	11142
9169	10598	11144
9173	10648	11153
9186	10679	11157
9189	10691	11170
9196	10704	11172
9214	10707	11203
9219	10719	11222
9239	10724	11253
9246	10752	11281
9264	10754	11298
9269	10757	11331
9289	10769	11372
9297	10785	11375
9314	10802	11400
9317	10804	11403
9342	10813	11420
9347	10825	11448
9367	10830	11450
9380	10832	11453
9391	10845	11481
9392	10858	11492
9408	10863	11498
9419	10873	11500
9436	10875	11509
9458	10882	11526
9464	10908	11528
9469	10910	11554
9497	10913	11559
9508	10923	11570
9514	10925	11578
9525	10938	11604
9536	10941	11609
9542	10951	11637
9570	10953	11654
9575	10958	11687
9586	10979	11926
9620	10986	
9625	10988	
9653	10991	
9670	11003	
9698	11019	
9703	11047	
9736	11052	
9748	11064	
9764	11079	

Fuente: Elaborado por el autor.