Erosión potencial por reconversión productiva en subcuenca Llay-Llay, Chile. aplicación de unidades de respuesta a la erosión

Potential erosion due to productive reconversion in Llay – Llay basin (cuenca), Chile. Applying response units to erosion

[△]José Luis Muñoz Marcillo[1], Jaime Morante Carriel[1], Pedro Miranda Ullón[2]

[1]Facultad de Ciencias Ambientales, Universidad Técnica Estatal de Quevedo. Campus Ing. Manuel Haz Álvarez, km 1.5 vía a Santo Domingo de los Tsáchilas. EC.120501. Quevedo, Ecuador. [△]josluimu@gmail.com; jmorante@uteq.edu.ec
[2]Facultad de Ciencias Empresariales. Universidad Técnica Estatal de Quevedo. Campus Ing. Manuel Haz Álvarez, km 1.5 vía a Santo Domingo de los Tsáchilas. EC.120501. Quevedo, Ecuador. pmiranda@uteq.edu.ec

Resumen

El objetivo de este estudio fue determinar la erosión potencial por reconversión productiva agrícola de la subcuenca de Llay-Llay perteneciente al valle del Aconcagua, en la V Región de Valparaíso en Chile, mediante la adaptación de las unidades de respuesta a la erosión (ERU´s), según Märker *et al*. (2001), las mismas fueron sometidas a un proceso analítico jerárquico previo a la modelización espacial final. La validación de las ERU´s se realizó a partir de los índices morfométricos de capacidad de transporte y estabilidad de laderas. Las ERU´s destacan por su carácter cualitativo y de distribución geo-espacial homogénea, dentro del área de estudio relacionadas con factores de erosividad y erodabilidad. Para entender el proceso evolutivo de reconversión productiva de la subcuenca de Llay-Llay en los últimos treinta años se aplicó el índice normalizado de vegetación (NDVI) a partir del análisis de imágenes de satélite multiespectrales Landsat ETM, mientras que para la modelización de las variables topográficas, pendiente del suelo y exposición de laderas, así como para el cálculo de los índices morfómetricos se utilizó un modelo de elevación digital del terreno (MDE) con una apropiada resolución espacial. La categoría de ERU´s de muy alta susceptibilidad a la erosión para la subcuenca de Llay-Llay corresponde al área cubierta por el cultivo de paltos (aguacate) en laderas, sitio en donde el índice morfométrico de estabilidad de laderas se presentó alto, mientras que las áreas con menor peligro de erosión, de la clase ERU´s de baja susceptibilidad son aquellas cubiertas por matorral arborescente denso.

Palabras clave: ERU´s, índices morfométricos, erodabilidad, erosividad, NDVI, MDE.

Abstract

The objective of this study was to determine potential erosion due to agricultural productive reconversion in Llay-Llay basin (sub-basin) located in the Aconcagua valley, at the V Valparaiso Region in Chile, through the adaptation of Marker´s *et al*. (2001) erosion response units (ERU's), which underwent a hierarchical analytic process previous to final spatial modelling. ERU´s validation was carried out on the basis of transport capacity and slopes stability morphometric indexes. ERU´s outstand due to their qualitative nature and to their homogeneous geo-spatial distribution within the study area, related to erosivity and erodability factors. In order to understand productive reconversion evolutionary process in Llay–Llay sub-basin for the last thirty years, the normalized vegetation index (NDVI) was applied through the analysis of Landsat multispectral satellite images ETM, while for modelling such topographic variables as soil slope and slope exposure, as well as for calculating morphometric indexes a terrain digital elevation model (MDE), with an appropriate spatial resolution was used. ERU´s category of very high susceptibility to erosion for Llay-Llay sub-basin corresponds to an area covered by paltos (avocado) plantations in slopes, where slopes stability morphometric index showed high values, while the areas having the least danger of erosion, according to ERU´s, low susceptibility class resulted to be those covered with dense arborecente scrub.

Key words: ERU´s, morphometric indexes, erodabilty, erosivity, NDVI, MDE.

Recibido: 23-mayo-2014. Recibido en forma corregida: 13-junio-2014.
Aceptado: 30-septiembre-2014.
Publicado como ARTÍCULO CIENTÍFICO en Ciencia y Tecnología 7(2): 35-47
Julio-Diciembre de 2014
ISSN 1390-4051 impreso; ISSN 1390-4043 electrónico
© Ciencia y Tecnología. UTEQ. Quevedo-Ecuador

Introducción

A partir de la década de los ochenta, Chile ha tenido un importante crecimiento económico, acompañado de un considerable desarrollo y modernización agrícola de sus cuencas, lo cual ha causado un doble efecto territorial al incorporar importantes impactos ambientales (Castro y Aliaga, 2010). Es importante destacar que el desarrollo económico en Chile, especialmente en territorios de notoria vocación exportadora estaría conllevando relevantes consecuencias ambientales como la degradación morfoedafológica (González, 1978; Londoño y Vargas, 1997).

La degradación es un proceso que provoca la pérdida de la capacidad productiva por deterioro físico, químico y biológico de los suelos (Carrasco y Riquelme, 2003). Así en el mundo sólo el 11% de las tierras son aptas, sin limitaciones, para cultivo y no necesitan de mejora alguna (FAO, 1995). El manejo de los recursos de la tierra, es de hecho, la práctica del uso de la misma, por parte de la población humana que habita en ella, la cual debería ser sostenible (FAO/Netherlands, 1991).

Entre los problemas ambientales de Chile se reconoce que los procesos erosivos son de mayor relevancia, especialmente para el sector silvoagropecuario. Según un estudio del Instituto de Recursos Naturales (CONAMA y MINAGRI, 1994 en Francke, 2002), de un total de 34.5 millones de hectáreas, en su gran mayoría de secano, correspondiente al 46% de Chile continental, alrededor de 2.4 millones (6.9%) están erosionados en forma muy severa; 9.2 millones (26.6%) en forma severa; 15.5 millones (45%) con daños moderados, y 7.4 millones (21.5%) están levemente afectados.

La erosión de los suelos en Chile, constituye en la actualidad uno de los problemas ambientales más significativos del sector silvoagropecuario (Araneda *et al*., 1999; Bonilla *et al*., 2010), el suelo es un recurso no renovable y dada a la propia actividad humana es altamente vulnerable, condiciones de variabilidad climática y cambio climático global (Yoma, 2003).

El manejo adoptado en las plantaciones en las laderas de los valles de la V Región de Valparaíso (limpieza total antes de plantar y aplicación de herbicidas para controlar el crecimiento de las malezas, unido a una falta de orientación a los agricultores sobre el método más apropiado a utilizar), podría traer como consecuencia, pérdida del recurso suelo, implicando una grave intervención en la dinámica de las laderas, permitiendo que ante un evento de precipitación, el agua arrastre sedimentos que al ser depositados, afecten a las plantaciones de los fondos valles, a los canales de regadío y a los cursos fluviales (Castro y Espinosa, 2008).

Las modificaciones en el paisaje natural como producto de la modernización agrícola es un hecho conocido en la comunidad internacional, en este ámbito resulta muy importante el análisis del suelo y su erodabilidad, principalmente en ambientes caracterizados por el alto impacto antrópico en donde las modernas técnicas de cultivos perturban la topografía de las vertientes aumentando la posibilidad de procesos de remoción en masa y erosión del suelo (Paz *et al*., 2009).

La presente investigación tuvo por objetivo determinarlos niveles de susceptibilidad a la erosión (erosión potencial) de la subcuenca Llay-Llay perteneciente al valle del río Aconcagua por reconversión productiva, empleando como metodología una adaptación de la propuesta por Märker *et al*. (2001) en combinación con el análisis jerárquico superior, previo el análisis evolutivo espacial histórico desde la década de los ’90 empleando el NDVI y complementado con la determinación de los índices morfométricos de estabilidad de laderas y capacidad de transporte.

Materiales y métodos

La cuenca del río Aconcagua se ubica en el extremo sur de los valles transversales, en la V Región de Valparaíso (Figura 1). Su extensión alcanza aproximadamente 7200 km^2 y su rumbo general es de Este a Oeste (SAG, 2005). Desde el punto de vista político-administrativo, la cuenca del río Aconcagua forma parte de la V Región de Chile abarcando parcialmente las provincias de Quillota, San Felipe, Aconcagua, Los Andes y Valparaíso. Los climas presentes en la cuenca del río Aconcagua corresponden a: Templado de tipo Mediterráneo con estación seca prolongada y frío de altura en la Cordillera de los Andes (CADE-IDEPE, 2004).

La superficie de la cuenca del río Aconcagua destinada al uso agrícola comprende 86,237 ha, equivalentes al 12% de la superficie total, además de 586 ha de terrenos cuyo uso se destina a rotación cultivo-pradera. La cuenca en su conjunto produce el 41% del total de paltos (aguacate) de Chile, cuyas plantaciones, y en general de los frutales, en los últimos años se ha visto intensificada en laderas de cerros con altas pendientes. Estas prácticas, si bien son muy rentables, debido a la exportación de la mayoría de la producción, han provocado un aumento de erosión y de pérdida de vegetación natural.

Se estableció como tarea principal la construcción y evaluación de unidades de respuesta a la erosión, ERU´s para la cuenca del río Aconcagua, adaptando lo expuesto por Märker *et al*., (2001) en el sur de África,

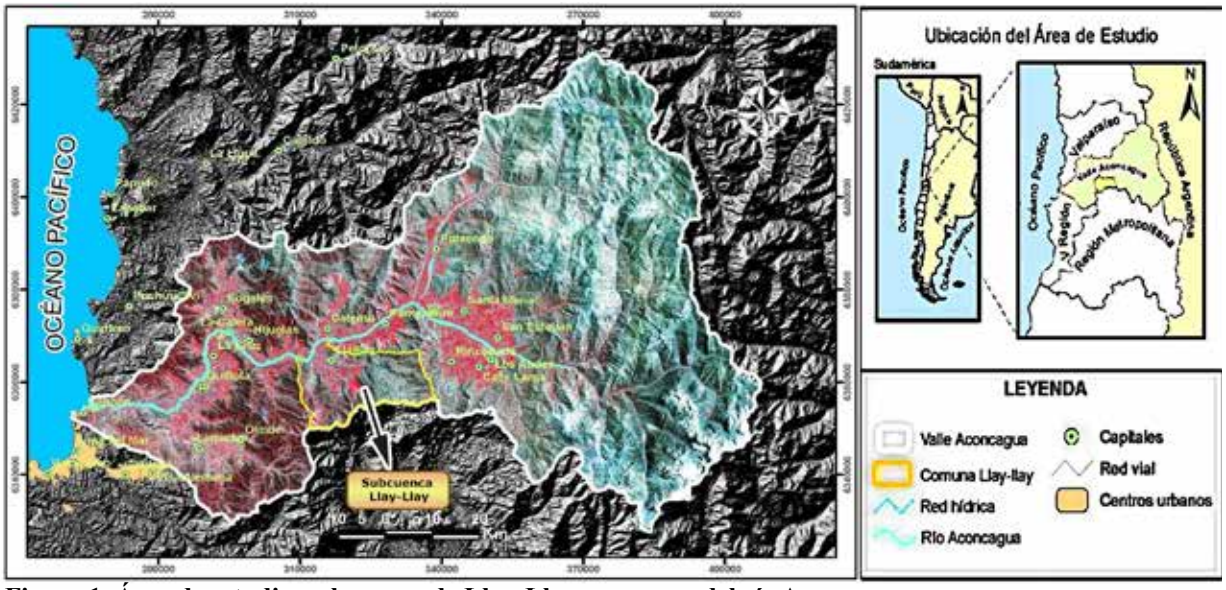

Figura 1. Área de estudio, subcuenca de Llay-Llay en cuenca del río Aconcagua

generando como resultado un mapa de niveles de susceptibilidad a la erosión para la subcuenca de Llay-Llay. En la Figura 2 se expone la metodología empleada para el presente estudio.

La generación de las unidades de respuesta a la erosión (ERU´s), para la subcuenca de Llay-Llay implicó el establecimiento de un modelo de vulnerabilidad con la integración de determinadas variables físico-naturales (Figura 3), luego de haber sido ponderadas mediante la aplicación del proceso analítico jerárquico (Saaty and Kearns,1991) fueron modeladas aplicando un proceso de reclasificación y sobreposición de capas digitales de información en un entorno de sistemas de información geográfica (SIG).

La determinación de la vulnerabilidad del suelo en la subcuenca de la comuna de Llay-Llay mediante la aplicación de las unidades de respuesta a la erosión en una adaptación a lo establecido por Märker *et al*. (2001) requirió la jerarquización de las variables físico-naturales seleccionadas, siendo las mismas: la precipitación, topografía, cobertura y textura del suelo. Producto de la jerarquización de las variables y subvariables a través del proceso analítico jerárquico se ponderó las capas de información físico–naturales a través de la estimación

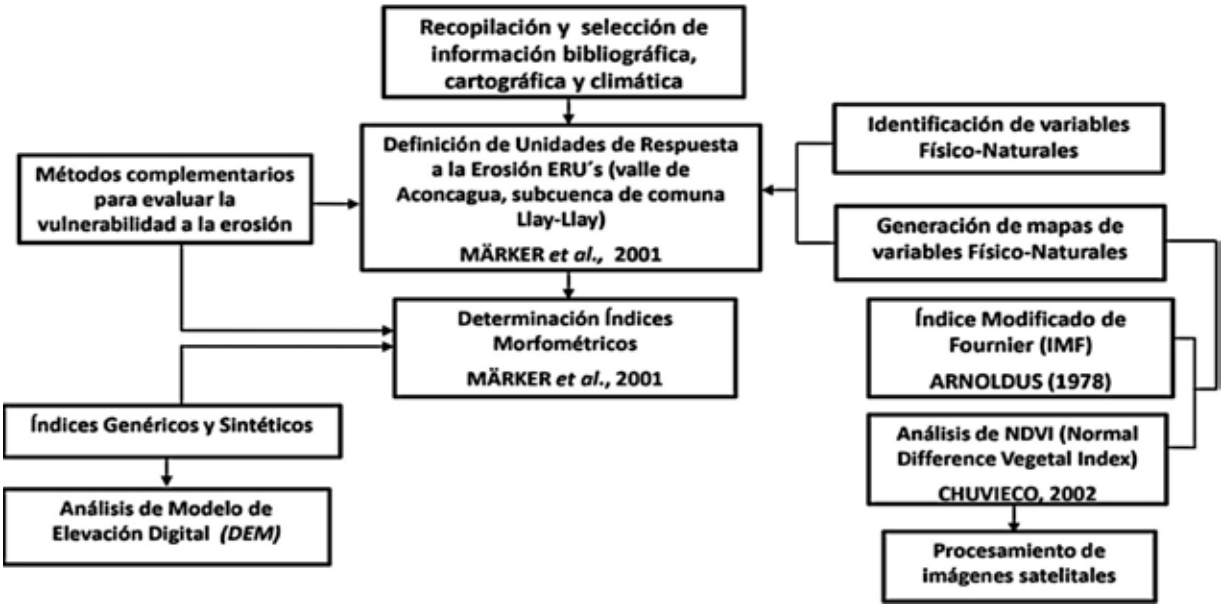

Figura 2. Esquema metodológico

Figura 3. Procedimiento de sobreposición de los parámetros utilizados para la determinación de ERU´s, adaptación Märker *et al*. (2001)

de sus importancias individualizadas sobre el proceso total de vulnerabilidad erosiva.

Después de construido el modelo jerárquico de acuerdo al objetivo planteado es importante ponderar el conjunto de factores que lo conforman, procediendo a determinar la importancia relativa que cada una posee sobre el valor absoluto del problema central, lo cual se logra mediante la comparación de importancias entre pares de elementos de la misma jerarquía de acuerdo a la matriz de comparación por pares de elementos (Cuadro 1).

Cuadro 1. Matriz de comparación 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 and Kearns (1991)

La determinación de la importancia relativa expresada por medio de la comparación en pares de los diferentes elementos se realizó en base a la Escala de Importancia Relativa de Saaty and Kearns (1991), la cual emplea criterios cualitativos y cuantitativos dado que permite adjudicar valores numéricos a criterios subjetivos en relación a la importancia de entre los diversos factores (Cuadro 2).

El proceso analítico jerárquico aplicado para la determinación de la vulnerabilidad a la erosión en la subcuenca de la comuna de Llay-Llay se elaboró en base a consulta realizada a expertos relacionados con el estudio de los procesos erosivos en Chile pertenecientes al Centro de información de recursos naturales (CIREN) así como a profesionales forestales vinculados con el manejo de cuencas hidrográficas que laboran en la Corporación Nacional Forestal (CONAF). Posteriormente se obtuvieron los pesos para las cuatro variables físico-naturales de nuestro Modelo de Vulnerabilidad a la Erosión, esto es, para la precipitación, topografía, uso del suelo y textura mediante el trabajo en la aplicación informática Expert Choice, considerando el nivel de inconsistencia del modelo que debe ser menor a -0.1 para que el modelo sea aceptable.

Para determinar la vulnerabilidad a la erosión de los suelos de la subcuenca de Llay-Llay ha sido factor clave el estudio y análisis sistemático, de manera individualizada, de las diferentes variables físico-naturales que participan en el proceso de interacción que conduce a la conformación del paisaje natural de un área en particular, a partir del tratamiento jerarquizado de las variables seleccionadas, lograr establecer, mediante una adaptación de lo expuesto por Märker *et al*. (2001) las denominadas Unidades de Respuesta a la Erosión (ERU´s) que el autor definió como unidades homogéneas susceptibles de erosión, las que pueden ser representadas de manera geo-espacial.

El análisis de la precipitación fue con base en la aplicación del índice modificado de Fournier IMF (Arnoldus, 1980 en Jordán y Bellifante, 2000). El cálculo de índice modificado de Fournier (IMF) se realiza para cada año y luego se obtiene el promedio. La clasificación del índice modificado de Fournier (IMF) se realiza de acuerdo a CORINE-CEC (1992) y Jordán y Bellifante (2000) en Rugiero (2006). Los datos empleados para el cálculo de la erosividad corresponden a un período de 29 años hasta el año 2006, en las estaciones meteorológicas distribuidas dentro del Valle del río Aconcagua, pertenecientes a la Estación Riecillos, Vilcuya, Los Andes, San Felipe, Catemu, Estero Rabuco, Lo Rojas, Rodelillo, Los Aromos, Quillota, Jahuel y Las Chilcas.

El análisis de la topografía se dividió entre el cálculo de las variables pendiente y exposición que fueron calculadas y modeladas a partir de un modelo de elevación digital (DEM) de alta resolución espacial empleando un software de sistemas de información geográfica. Para la generación del DEM se utilizaron curvas de nivel con resolución de 10 metros que cubren toda la superficie del valle de Aconcagua, facilitadas por el Centro de información de recursos naturales de Chile (CIREN).

Se consideraron las coberturas del suelo de la subcuenca de Llay-Llay según el grado de protección (Aliaga y Leyton, 2007). Las diferentes coberturas vegetacionales se clasificaron relacionando el grado de recubrimiento vegetal y según la intensidad de los procesos erosivos, adaptados de López (1994). Para la determinación de la erodabilidad, de acuerdo al uso del suelo en la comuna de Llay-Llay, se empleó el

Cuadro 2. 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 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 fuerte 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 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 1/3, un elemento es ligeramente menos importante sobre la problemática

Fuente: Saaty and Kearns (1991)

estudio de catastro de bosque nativo realizado por la CONAF-CONAMA en el año 2001. Cabe destacar que este Catastro se integró con la superficie de cultivos de paltos existentes (CIREN, 2007).

La aproximación para la determinación de la evolución histórica en treinta años de la densidad vegetal en el valle del río Aconcagua se realizó a partir de la aplicación del NDVI. Los parámetros que se relacionan con este índice son: el contenido de clorofila en la hoja, presentando correlaciones altas y linealmente positivas; el contenido de agua en la hoja a través de correlaciones negativas y lineales y, la productividad neta o biomasa de la vegetación, entre otros (Chuvieco, 2002). El NDVI para la cuenca de Lay-Llay se realizó a partir de imágenes Landsat ETM de los años 1975, 1989, 1999, 2007 con una resolución espacial de 20 metros por pixel.

Además se establecieron diferentes clases texturales a partir del estudio agrológico para la V Región de Valparaíso (CIREN-CORFO, 1997), de esta manera se clasificó la textura del suelo por su grado de erosionabilidad, de acuerdo a lo establecido por Morgan (1997).

Con los cálculos del índice morfométrico de capacidad de transporte, TCI (Olaya y Conrad 2008) y del índice de estabilidad, SI (Pack *et al*., 2001), se evaluó y analizó espacialmente la dinámica topográfica en el valle del río Aconcagua identificando áreas con una mayor vulnerabilidad para generar movimientos del terreno en masa, erosión de tipo lineal o problemas de inundación, que de manera recurrente representan un riesgo para el hombre.

$$TCI = \frac{C + cos\emptyset.\left[1 - min\left(\frac{R}{T}\frac{a}{sin\emptyset}, 1\right)r\right]tan\emptyset}{sin\emptyset}$$

Dónde:
C = Cohesión del suelo
θ = Arco Tangente de la pendiente
R = Parámetro topográfico
T = Parámetro topográfico
a = Variable topográfica
r = Densidad del suelo
Tang φ = Ángulo de fricción interna del suelo

$$SI = FS_{min}\frac{C_1 + cos\emptyset.\left[1 - min\left(x_2\frac{a}{sin\emptyset}, 1\right)r\right]t_1}{sin\emptyset}$$

Dónde:
FS_{min} = Factor de seguridad menor a 1
a = Variable topográfica
θ = Arco Tangente de la pendiente

C1 = Cohesión del suelo
t_1 = Parámetro topográfico
r = Densidad del suelo
x_2 = Incertidumbre temporal y espacial

Resultados y discusión

El análisis del NDVI para el año 1975 muestra que un 91% de la superficie de la comuna presentaba una cobertura moderadamente baja, poco más de un 1% concentraba un rango de cobertura vegetacional bajo, localizado en las altas pendientes de los cerros circundando al fondo de valle, mientras que un 7% de la superficie de la subcuenca presentaba una cobertura moderadamente alta que se distribuye en el fondo de valle de la subcuenca y que debería corresponder a cultivos agrícolas (Figura 4 y Cuadro 3).

En el año 1989 el NDVI calculado para la subcuenca de Llay-Llay muestra una variación en relación a la densidad vegetal del año 1975. Se puede apreciar un 54% de cobertura moderadamente baja frente a un 44% de superficie con una densidad vegetacional moderadamente alta, distribuida en el fondo de valle así como en ciertos sectores de piedmont de los cerros circundantes, (Figura 5 y Cuadro 4).

La determinación de las unidades de respuesta de la erosión (ERU´s) conllevó el establecimiento y desarrollo de un modelo analítico jerárquico (Saaty and Kearns,1991), realizado a partir de la consulta a expertos de la Corporación nacional forestal de Chile (CONAF) y del Centro de información de recursos naturales de Chile (CIREN) empleando el software expert choice (Cuadro 5), que definiera los pesos individuales de las variables que componen el

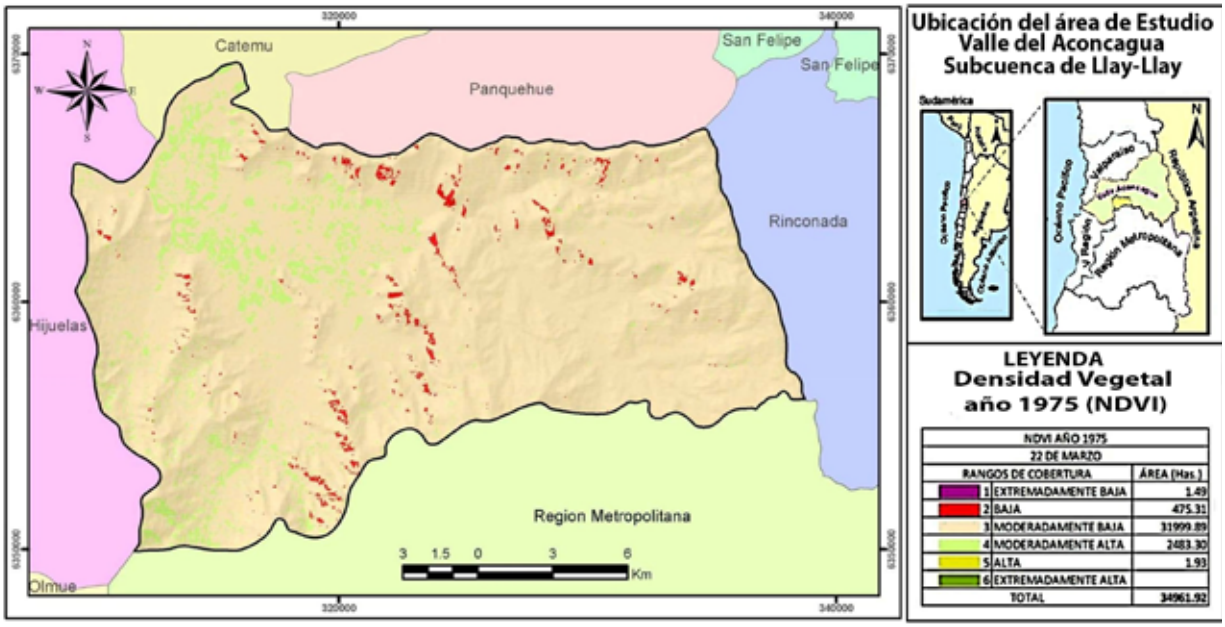

Figura 4. NDVI año 1975, Subcuenca de Llay-Llay (en base a imagen Landsat ETM)

Cuadro 3. Densidad vegetal (NDVI), año 1975

Rangos de cobertura		Densidad vegetal (%)	Área (ha)	Superficie subcuenca (%)
1	Extremadamente baja	< 10	1.49	0.00
2	Baja	10-25	475.31	1.36
3	Moderadamente baja	26-50	31999.89	91.53
4	Moderadamente alta	51-75	2483.30	7.10
5	Alta	76-90	1.93	0.01
6	Extremadamente alta	> 90		
Total			**34961.92**	**100.00**

En base a imagen LANDSAT ETM

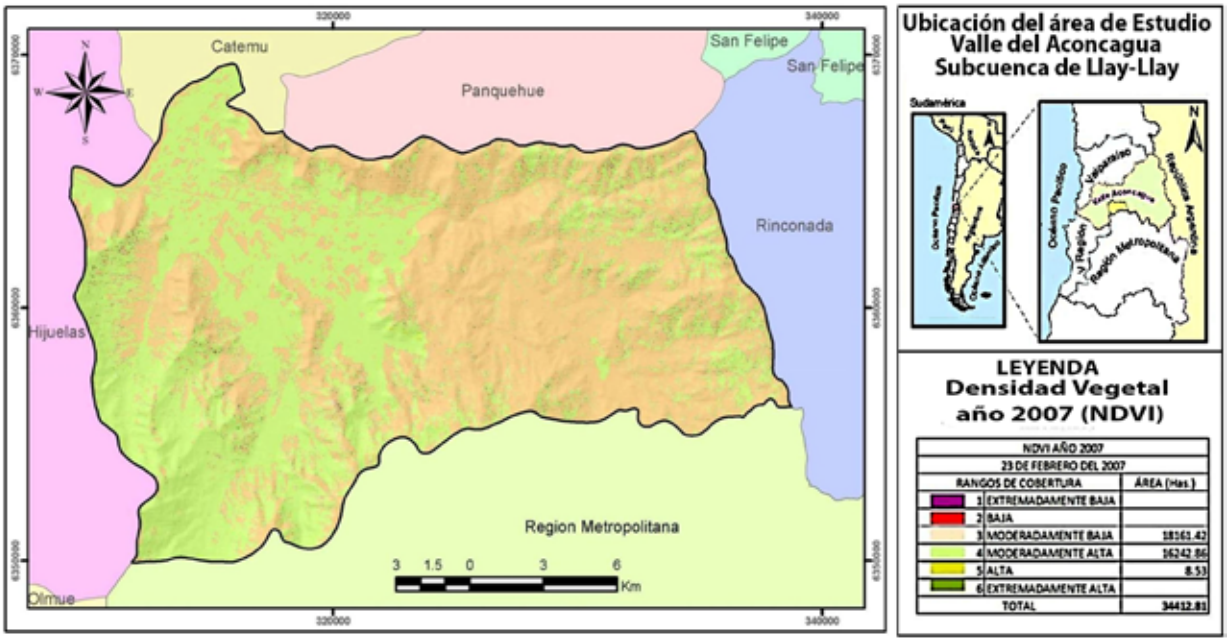

Figura 5: NDVI año 1989, Subcuenca de Llay-Llay (en base a Imagen Landsat ETM)

Cuadro 4. Densidad Vegetal (NDVI), año 1989

Rangos de cobertura		Densidad vegetal (%)	Área (ha)	%
1	Extremadamente baja	< 10		
2	Baja	10-25		
3	Moderadamente baja	26-50	18161.42	52.78
4	Moderadamente alta	51-75	16242.86	47.20
5	Alta	76-90	8.53	0.02
6	Extremadamente alta	> 90		
Total			**34412.81**	**100.00**

En base a Imagen LANDSAT ETM

modelo de vulnerabilidad en relación con el proceso global de susceptibilidad a la erosión en la subcuenca de Llay-Llay (Figura 6)

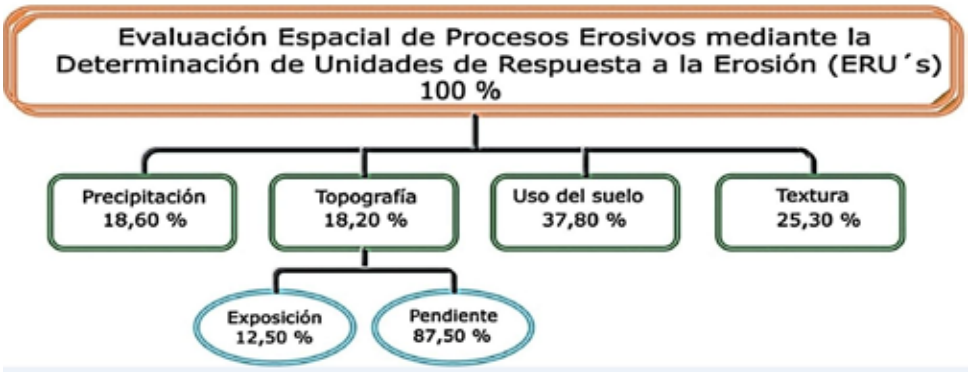

Figura 6. Estructura analítica jerárquica a partir de CIREN y CONAF (2009)

Cuadro 5. Pesos de las variables y categorías según importancia, CIREN y CONAF (2009)

Variable	Categoría	Peso (%)	
			0.186
Precipitación (agresividad pluvial)	Muy bajo	0.006	
	Bajo	0.010	
	Moderado	0.024	
	Alto	0.057	
	Muy alto	0.089	
Topografía			**0.182**
		0.023	
Exposición	Bajo	0.001	
	Madio bajo	0.014	
	Medio	0	
	Medio alto	0	
	Alto	0.006	
		0.159	
Pendiente	Muy bajo	0.005	
	Bajo	0.009	
	Moderado	0.016	
	Alto	0.039	
	Muy alto	0.091	
			0.378
Uso del suelo	Bajo	0.013	
	Medio	0.031	
	Alto	0.100	
	Muy Alto	0.234	
			0.253
Textura del suelo	Muy Baja	0.011	
	Baja	0.016	
	Moderada	0.029	
	Alta	0.057	
	Muy Alta	0.140	
Valor Inconsistencia		**0.090**	

Las unidades de respuesta de la erosión, ERU´s calculadas para la subcuenca de Llay-Llay se presentan en la Figura 7.

Como resultado de la sobreposición y combinación de los factores físico-naturales ponderados con ayuda SIG se obtuvieron 425 combinaciones, que sometidas a un proceso de reclasificación, permitió discriminar en cuatro clases la susceptibilidad erosiva para la subcuenca de Llay-Llay (Cuadro 6).

El análisis de la distribución espacial de las unidades de respuesta a la erosión en la subcuenca de Llay-Llay muestra que la vulnerabilidad a la erosión presente, aumenta conforme se eleva la pendiente, tal como se observa en los sectores de la subcuenca de Llay-Llay que incluyen la clase de pendiente alta correspondiente de entre 10° a 20° de inclinación

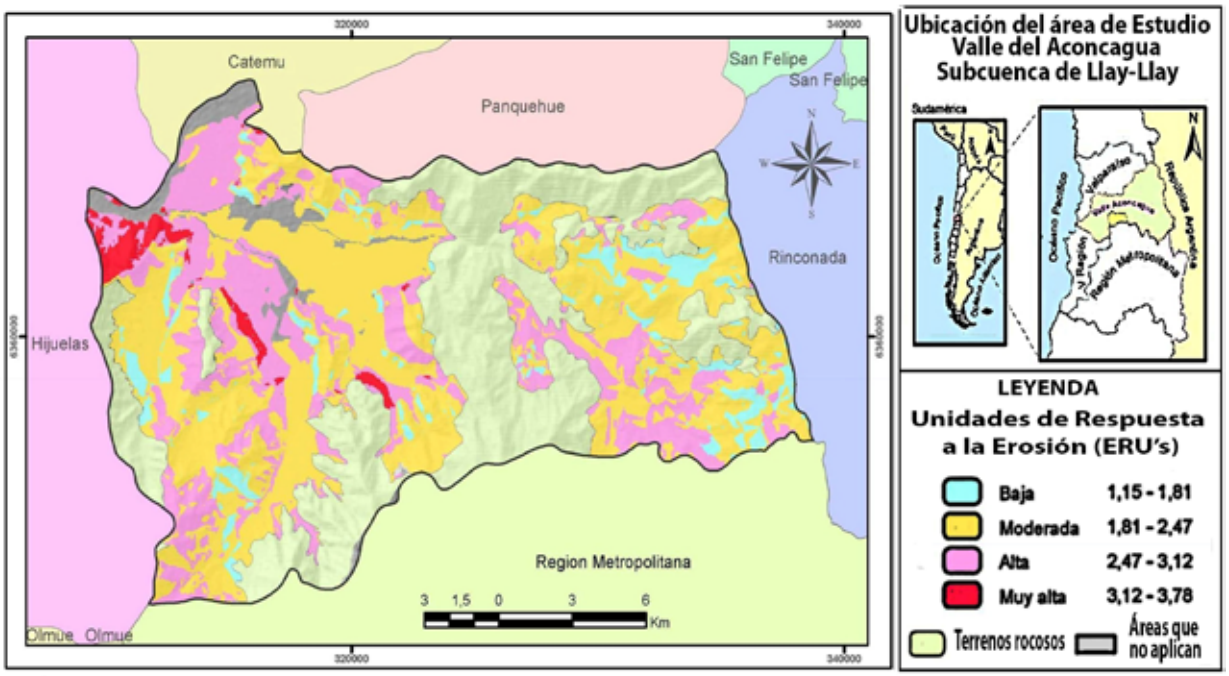

Figura 7. Unidades de respuesta a la erosión (ERU´s)

Cuadro 6. Susceptibilidad erosiva para comuna de Llay-Llay

Susceptibilidad erosiva	Superficie (ha)	Porcentaje
Baja (1.16 a 1.81)	1761.59	7.66
Moderada (1.81 a 2.47)	13177.15	57.32
Alta (2.47 a 3.12)	7408.04	32.23
Muy alta (3.12 a 3.78)	640.71	2.79
Total	**22987.49**	**100.00**

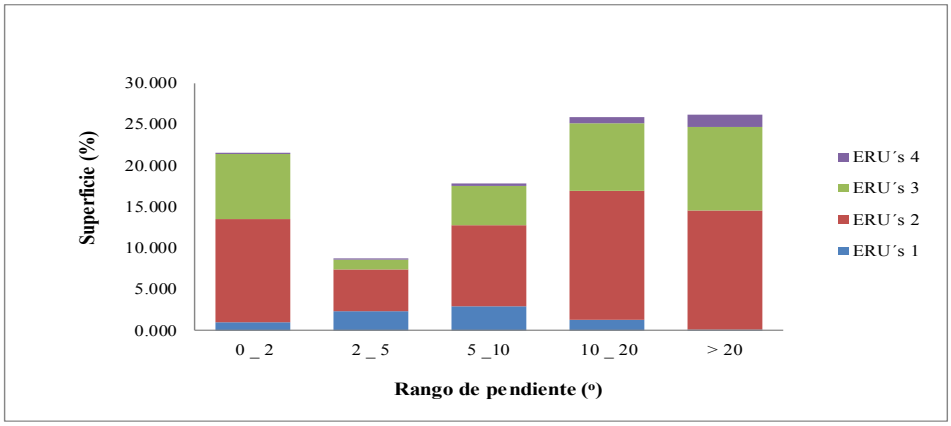

Figura 8. Clases de ERU´s de acuerdo a la pendiente subcuenca de Llay-Llay

(Figura 8). La distribución de las unidades de respuesta a la erosión (ERU´s) de acuerdo al uso del suelo que está dado por ladiversa cobertura vegetal presente y que la provee distintos niveles de protección al suelo ante la lluvia indica una susceptibilidad erosiva baja en la clase ERU´s 1, que corresponde a cobertura de bosques, mientras que los diferentes tipos de praderas y matorrales se hayan presentes en diversas proporciones en las cuatro clases de ERU´s (Figura 9).

Con el índice de capacidad de transporte se

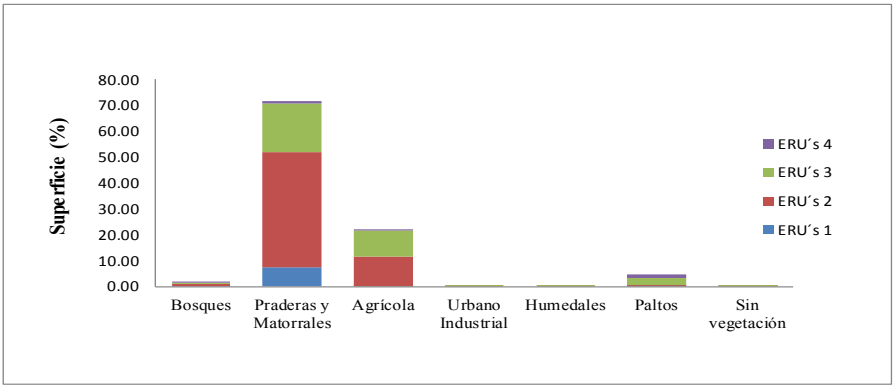

Figura 9. Clases de ERU´s de acuerdo al uso de suelo

determinaron sectores con una baja capacidad en un 31% de la subcuenca y que se ubican en el fondo de valle en áreas ligeramente planas, mientras que las zonas con una alta capacidad de transporte se encuentran en su gran mayoría (54%) en las zonas de piedmonts, laderas y cerros (Figura 10 y Cuadro 7). El índice morfométrico de estabilidad de laderas (SI) determinó que en la subcuenca de Llay-Llay, las áreas estables se concentran en un 56% (194 km^2) en el fondo de valle, así como en áreas contiguas de ligera pendiente. El sector inestable, comprende un 44% (155 km^2) del área analizada, se circunscribe mayormente a las zonas escarpadas y de cerros con los espacios de pendiente alta y muy alta, entre 10°-20° y de 20°-90° respectivamente, quedando confirmado que la pendiente es un rasgo topográfico muy importante y determinante para los procesos erosivos vinculados con la remoción en masa en áreas con afectación antrópica, (Figura 11).

La aplicación del índice modificado de Fournier (IMF), (Arnoldus, 1980 en Jordán y Bellifante, 2000) como indicador de la erosividad fue propicia ya que el índice de Fournier, no considera que existen zonas cuyo régimen pluvial presenta más de un pico mensual de precipitación, siendo este el caso del valle del Aconcagua.

Las unidades de respuesta a la erosión (ERU's) obtenidas para la subcuenca de Llay-Llay demuestran que la categoría de baja susceptibilidad erosiva se corresponde con áreas que presentan una cobertura boscosa de tipo matorral arborescente denso y renoval denso pese a que en estos sectores se presenta una pendiente de entre 10° y 20°. Por otra parte, la clase alta de ERU´s se emplaza en las áreas de ladera que han sido intervenidas para el establecimiento del cultivo exótico

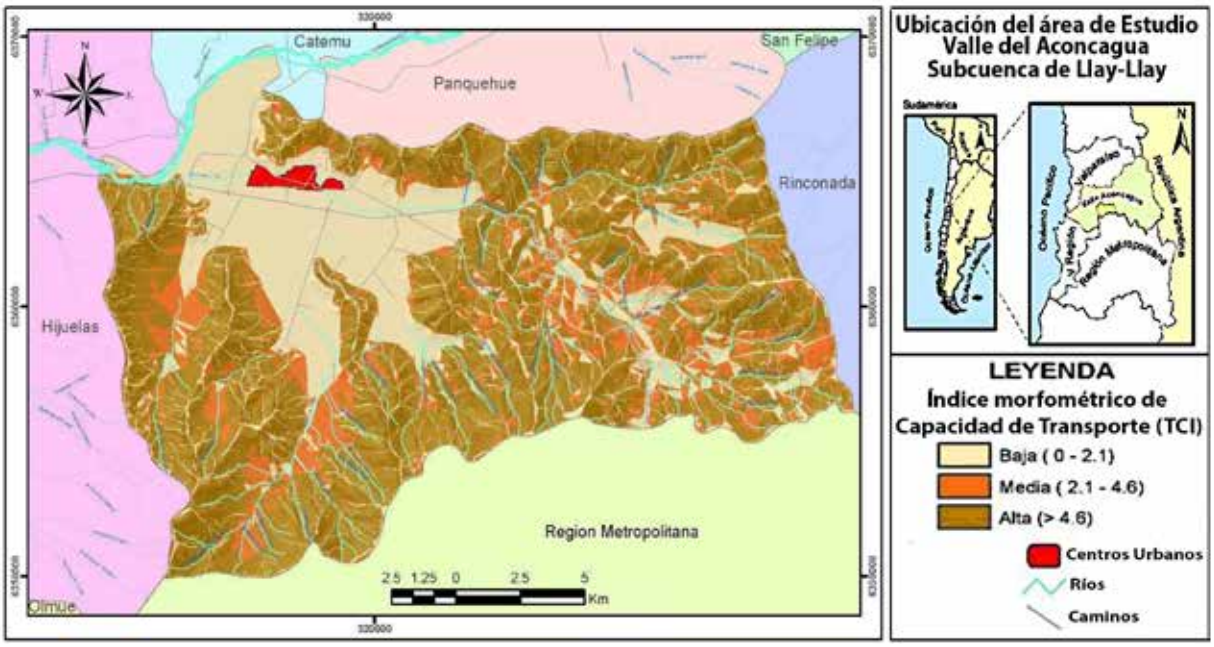

Figura 10. Índice de capacidad de transporte (TCI), adaptado de Fernández *et al.* (2007)

Cuadro 7. Distribución del índice de capacidad de transporte (TCI)

TCI	km²	Porcentaje
Baja	110	31
Media	51	15
Alta	189	54
Total	**350**	**100**

Adaptado de Fernández *et al.* (2007)

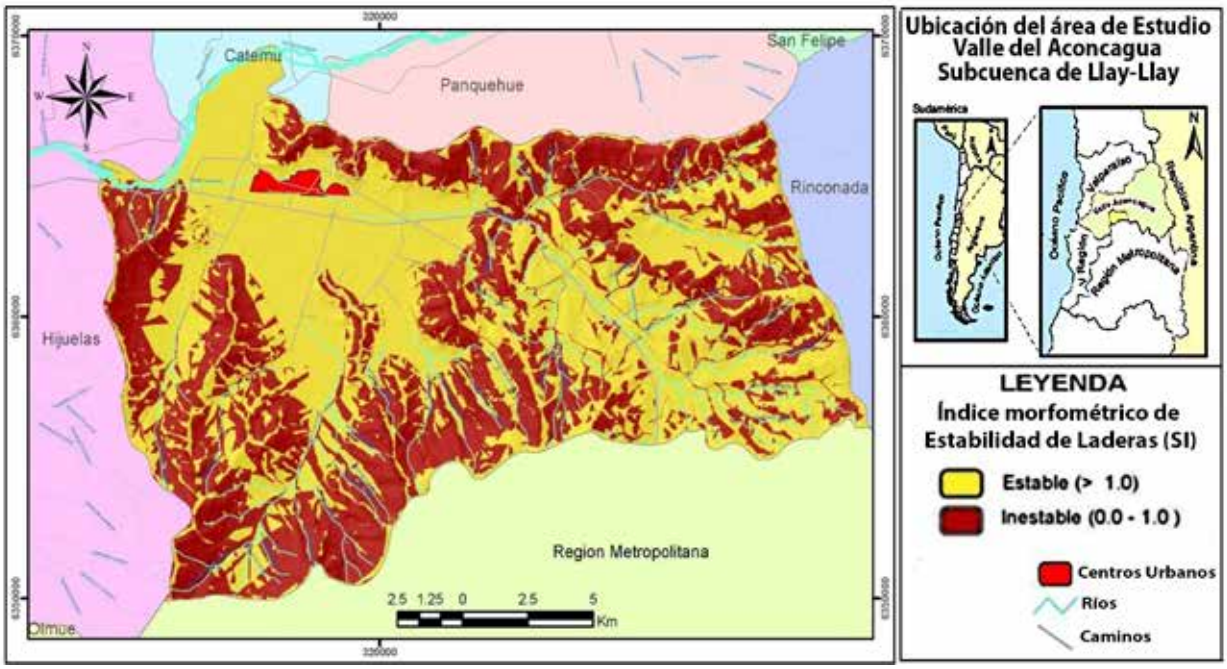

Figura 11. Estabilidad de Laderas (SI), adaptado de Fernández *et al*. (2007)

de paltos (aguacate). De esta manera se comprueba que pese a la presencia de pendientes del tipo alto (mayores de 10°) con cobertura boscosa en sus diferentes clases el efecto potencial de la erosión se atenúa de manera importante impidiendo la derivación de un problema de erosión real.

La principal causa para la degradación del suelo en ambientes de tipo mediterráneo como el que se desarrolla en el valle Aconcagua se debe a la eliminación de la vegetación del bosque nativo y matorrales (García, 2004), determinación que se reafirma en la subcuenca de Llay-Llay. En las áreas de ladera, en donde se ha reemplazado la vegetación nativa por el cultivo exótico de paltos (aguacate), se presenta una alta susceptibilidad a la erosión.

La cobertura vegetal como técnica dentro de la práctica de manejo y conservación de suelos en tierras inclinadas debe prevalecer por encima de obras físicas o estructurales ya que estas últimas son difíciles de adoptar por parte del agricultor debido a su elevado costo económico (Carrasco y Riquelme, 2003). En este sentido al recorrer la subcuenca de la comuna de Llay-Llay se evidenció en las laderas donde se han establecido plantaciones de paltos (aguacates) la ausencia de barreras vivas u obras de infraestructura para minimizar el impacto que causan las plantaciones sobre el suelo, al emplear labores culturales no sustentables.

El modelo de vulnerabilidad a la erosión en una adaptación de lo expuesto por Märker *et al*., (2001), aplicado a la subcuenca de la comuna de Llay-Llay, proporcionó particular importancia a la cobertura del suelo de acuerdo al tipo de vegetación ya que dependiendo de la densidad y temporalidad de los cultivos así como del impacto medio ambiental que pueden causar aumentaría la energía del impacto de las gotas de lluvia en el suelo, elevándose el proceso de escorrentía con la consecuente pérdida neta del suelo y de su capacidad de mantener vida. De este modo

Las áreas de la subcuenca de la comuna de Llay-Llay que presentan la mayor vulnerabilidad a la erosión se coinciden con los parámetros de clase de cobertura del suelo (plantaciones de paltos) y el elevado grado de la pendiente.

Conclusiones

La aplicación en una adaptación de las unidades de respuesta a la erosión ERU's permitió evaluar la susceptibilidad a la erosión de la subcuenca de Llay-Llay en términos cualitativos, como consecuencia de la reconversión productiva acaecida durante las últimas tres décadas en el área de estudio, cambio en el uso y cobertura del suelo que pudo ser evidenciado por las determinaciones del NDVI. De esta manera se demostró que la intervención antrópica de las laderas de la subcuenca, al reemplazar la cobertura natural del suelo por el cultivo exótico de paltos (aguacate), ha elevado el grado de vulnerabilidad del suelo ante futuros procesos erosivos, tal como se demostró con la aplicación del análisis de la dinámica topográfica de la subcuenca, mediante la aplicación de los índices morfométricos de capacidad de transporte y estabilidad de laderas.

La susceptibilidad a la erosión resultó estar condicionada, además de la pendiente, por el uso del suelo en asociación con la cobertura vegetal natural existente en la actualidad. Consecuentemente las clases de susceptibilidad a la erosión alta y muy alta se encuentran relacionadas con superficies carentes de vegetación, donde el suelo no cuenta con protección frente a la erosividad de las precipitaciones, mientras que susceptibilidades de erosión ligera a moderada están asociadas a usos de bosques, suelos agrícolas, matorrales y praderas. Este factor está íntimamente ligado a la componente topográfica, donde suelos de altas pendientes, altamente vulnerables a la degradación, sin cobertura vegetacional, presentan mayores posibilidades de erosionarse.

Bibliografía

Aliaga, S.C., Leyton, H.N. 2007. Evaluación de la pérdida de suelo y de su calidad, asociado al proceso de expansión urbana y reconversión productiva, Valle del Aconcagua, Comunas de Los Andes, Quillota y Concón. Tesis de Ingeniería Civil en Geografía. Santiago, Chile. Universidad de Santiago de Chile, Facultad de Ingeniería, 130 p.

Araneda, A., Cisternas, M., Urrutia, R. 1999. USLE y análisis isotópicos en la reconstrucción de la historia erosional en una cuenca lacustre. Bosque (Valdivia), 20(2): 95-105.

Bonilla, C., Reyes, J., Magri, A. 2010. Estimación de la Erosión Hídrica empleando la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada (RUSLE) y SIG en Chile Central. Revista Chilena de Investigación Agrícola, 70(1): 159-169.

CADE-IDEPE. 2004. Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad. Cuenca del río Aconcagua, Gobierno de Chile. Ministerio de Obras Públicas. Dirección General de Aguas. 160 p.

Carrasco, J. y Riquelme, J. 2003. Métodos y prácticas de conservación de suelos y aguas. Instituto de investigaciones agropecuarias, INIA. Boletín Nº 103. Rancagua, Chile, 132 p.

Castro, C., Aliaga, C. 2010. Evaluación de la pérdida de suelo, asociada al proceso de expansión urbana y reconversión productiva. Caso: comunas de Los Andes, Quillota y Concón, valle del Aconcagua. Revista de Geografía Norte Grande, Santiago, 45: 41-49

Castro, E., y Espinosa, M. 2008. Evaluación ambiental de plantaciones de paltos en laderas. Cuenca del río Petorca. región de Valparaíso. Tesis de Master. Santiago, Chile. Centro de información de recursos naturales (CIREN), 170 p.

CIREN (Centro de Información de Recursos Naturales). 2009. Determinación de erosión actual y fragilidad de suelos en la v región utilizando datos satelitales y sig. Santiago, Chile, 82 p.

CIREN (Centro de Información de Recursos Naturales)-CORFO (Corporación de Fomento de la Producción). 1997. Estudio agrológico V Región, Santiago, Chile.

Chuvieco, E. 2002. Teledetección Ambiental. La Observación de la Tierra desde el Espacio. Primera edición. Ediciones Ariel. Barcelona, España. 586 p.

FAO. 1995. Necesidades y recursos. Geografía de la agricultura y la alimentación. Roma.

FAO/Netherlands. 1991. Conference on Agriculture and the Environment, `S-Hertogenbosch, Netherlands, Report of the Conference2: 15-19.

Fernández, R., Paz, C., Rugiero, V. 2007. Aplicación de índices morfométricos en la evaluación de los procesos geodinámicas presentes en la región Metropolitana de Santiago. Anales Sociedad Chilena de Ciencias Geográficas, pp. 29-30.

Francke, S. 2002. Control de erosión en terrenos degradados vía dl. 701 de fomento forestal. En: Pérez, C. Manejo de microcuencas y prácticas conservacionistas de suelo y agua. Serie de actas N°22. Chillán. Chile. Pp. 55-82.

García, P. 2004. Ecología del bosque mediterráneo en un mundo cambiante en: Valladares, F. Interacciones

entre la vegetación y la erosión hídrica. Madrid, Ministerio de Medio Ambiente. Pp. 309-334.

González, A.C. 1978. La administración de los recursos naturales en una sociedad moderna. El trimestre económico. Fondo de Cultura Económica 45(180): 951-964.

Jordán, A., Bellinfante, N. 2000. Cartografía de la erosividad de la lluvia estimada a partir de datos pluviométricos mensuales en el campo de Gibraltar (Cádiz). Edafología 7(3): 83- 92.

Lagos, M. 2005. Protocolo para selección de alternativas para la conservación de suelos en laderas. Serie técnica N° 18. Servicio Agrícola y Ganadero (SAG). Santiago, Chile. 80 p.

Londoño, L., Vargas, E. 1997. Desarrollo económico sostenible, relaciones económicas internacionales y recursos minero-energéticos en Colombia. Tesis de Maestrante, Universidad Nacional, Facultad de Ciencias Humanas, Medellín, 246 p.

López, F. 1994. Restauración hidrológica forestal de cuencas y control de erosión. Tragsa-Tragsatec. Madrid, 902 p.

Märker, M., Moretti, S., Rodolfi, G. 2001. Assesment of water erosion processes and dynamics in semiarid regions of Southern Africa (kwazulu/natal, RSA, and Swaziland) using the erosion response units concept (ERU). Geogr. Fís. Dinam. Quat. 24: 71-83.

Morgan, R.P.C. 1997. Erosión y conservación del suelo. Ediciones Mundi Prensa, España. 343 p.

Paz, C., Soto, M., Fernández, R., Märker, M., Rodolfi, G. 2009. Impacto en la geodinámica actual del valle de Nantoco, cuenca del río Copiapó, asociado a la reconversión productiva, Revista de Geografía Norte Grande. Santiago 42: 81-99.

Rugiero De Souza, V. 2006. Suelos potencialmente aptos para revegetación o uso agrícola a partir de la utilización de biosólidos provenientes de las plantas de tratamiento de aguas servidas en la provincia de Chacabuco, región Metropolitana. Tesis Geógrafa. Santiago, Chile. Universidad de Chile. Facultad de Arquitectura y Urbanismo. 215 p.

Saaty, T.L., Kearns, K. 1991. Analytical planning. The organization of systems. The analytic hierarchy process series. Vol. 4. Rws publications. Pittsburgh, PA, EEUU. 208 p.

SAG. (Servicio Agrícola y Ganadero). 2005. Desarrollo de una metodología para la evaluación y mitigación de la contaminación de aguas y suelo: aplicación a la cuenca del río Aconcagua. Santiago. 242 p.

Soto, M., Märker M., Arriagada, J., Castro, C., Rodolfi, G. 2010. Evaluación de la amenaza natural en ambiente semiárido, sustentada en la geomorfología y el modelamiento de índices topográficos. Salamanca región de Coquimbo, Chile. Investigaciones Geográficas. Santiago, 42: 19-36

Yoma, R. 2003. Evaluación física de la erosión en plantaciones de *Pinus radiata* D. Don en la Reserva Nacional Lago Peñuelas, V Región. Período 1998-2001. Tesis de grado. Facultad de Ciencias Silvoagropecuarias. Universidad Mayor. Santiago. Chile. 110 p.