



**Análisis de la degradación  
morfoedafológica y su relación  
con la reconversión productiva**

José Luis Muñoz Marcillo  
Carmen Paz Castro Correa



# **Análisis de la degradación morfoedafológica y su relación con la reconversión productiva**

**José Luis Muñoz Marcillo  
Carmen Paz Castro Correa**

**Análisis de la degradación  
morfoedafológica y su relación  
con la reconversión productiva**

Título original:  
Análisis de la degradación  
morfoedafológica y su relación  
con la reconversión productiva  
Primera edición: enero 2020

© 2020, José Luis Muñoz Marcillo  
Carmen Paz Castro Correa  
Publicado por acuerdo con los autor.

© 2020, Editorial Grupo Compás  
Guayaquil-Ecuador

© Universidad Técnica Estatal de Quevedo  
Publicación derivada del 5to Congreso Multidisciplinario  
de Investigación Científica.  
Guayaquil-Ecuador

Grupo Compás apoya la protección del copyright, cada uno de sus textos han sido sometido a un proceso de evaluación por pares externos con base en la normativa del editorial.

El copyright estimula la creatividad, defiende la diversidad en el ámbito de las ideas y el conocimiento, promueve la libre expresión y favorece una cultura viva. Quedan rigurosamente prohibidas, bajo las sanciones en las leyes, la producción o almacenamiento total o parcial de la presente publicación, incluyendo el diseño de la portada, así como la transmisión de la misma por cualquiera de sus medios, tanto si es electrónico, como químico, mecánico, óptico, de grabación o bien de fotocopia, sin la autorización de los titulares del copyright.

Editado en Guayaquil - Ecuador

ISBN: 978-9942-33-173-1

Cita.

J. Muñoz, C. Castro (2020) Análisis de la degradación morfoedafológica y su relación con la reconversión productiva , Editorial Grupo Compás, Guayaquil Ecuador, 180 pag

## Prólogo

El libro se presenta como resultado de una investigación se centra en la evaluación de la vulnerabilidad a la degradación edafológica en el valle del río Aconcagua en la V Región de Valparaíso, mediante la aplicación de las Unidades de Respuesta a la Erosión (ERU's), que corresponden a unidades homogéneas que destacan por su carácter cualitativo y de distribución geo-espacial dentro del área de estudio, así como por reunir características resultantes de la superposición ponderada de variables físico-naturales que operan en el valle. Se busca establecer adicionalmente la relación entre el proceso de reconversión agrícola productiva dentro de la dimensión témporo-espacial acaecido en el valle y su relación con la susceptibilidad a los procesos erosivos. Mediante la generación de Índices Morfométricos se analiza la dinámica topográfica a partir de un Modelo de Elevación Digital (*DEM*).

Las diferentes unidades de susceptibilidad a la erosión resultantes para la subcuenca testigo de la comuna de Llay-Llay, han brindado la posibilidad de comprender las interrelaciones que ocurren entre factores como la erosividad de la precipitación, la erodabilidad del suelo así

como la cobertura del suelo y la intervención en la dinámica morfológica de laderas. Del mismo modo los índices morfométricos han permitido el establecimiento de áreas con mayor riesgo a provocar desprendimiento y remoción de materiales ante un evento de precipitación importante.

## ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	6
CAPÍTULO 1 .....	10
EROSIÓN EN CHILE.....	10
RELACIÓN ENTRE EL USO Y MANEJO DEL SUELO CON EROSIÓN .....	12
MODERNIZACIÓN PRODUCTIVA EN EL VALLE DEL ACONCAGUA.....	18
ÁREA TESTIGO. SUBCUENCA DE LA COMUNA DE LLAY-LLAY .....	25
ANTECEDENTES DEL SISTEMA FÍSICO NATURAL DEL VALLE DEL ACONCAGUA.....	27
DIVISIÓN POLÍTICA Y RED VIAL DEL VALLE DEL ACONCAGUA.....	35
USO DEL SUELO DEL VALLE DEL ACONCAGUA .....	37
COBERTURA DEL SUELO .....	41
TEXTURA DEL SUELO .....	44
ÍNDICE NORMALIZADO DE LAS DIFERENCIAS VEGETACIONALES (NDVI) .....	47
DINÁMICA DE LA EROSIÓN .....	47
EROSIVIDAD .....	52
ERODABILIDAD.....	54
EROSIÓN HÍDRICA .....	56
CAPÍTULO 2 .....	61
DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN .....	61
RECOPIACIÓN Y SELECCIÓN DE INFORMACIÓN .....	64
INFORMACIÓN CARTOGRÁFICA .....	65
IMÁGENES SATELITALES .....	66

FOTOGRAFÍAS AÉREAS.....	66
UNIDADES DE RESPUESTA A LA EROSIÓN (ERU´S) .....	66
PRECIPITACIÓN .....	70
TOPOGRAFÍA.....	76
COBERTURA DEL SUELO Y DENSIDAD VEGETAL.....	81
TEXTURA .....	84
ÍNDICES MORFOMÉTRICOS.....	85
PROCESO ANALÍTICO JERÁRQUICO .....	87
PROCESO ANALÍTICO JERÁRQUICO .....	90
COBERTURA DEL SUELO DE LA COMUNA DE LLAY-LLAY.....	98
VULNERABILIDAD A LA EROSIÓN MEDIANTE UNIDADES DE RESPUESTA A LA EROSIÓN (ERU´S) PARA LA COMUNA DE LLAY-LLAY. ....	108
EROSIONABILIDAD SEGÚN TOPOGRAFÍA DEL TERRENO .....	114
EROSIONABILIDAD SEGÚN USO DEL SUELO.....	118
EROSIONABILIDAD SEGÚN TEXTURA DEL SUELO .....	123
DEFINICIÓN DE ERU´S .....	126
DETERMINACIÓN DE ÍNDICES MORFOMÉTRICOS.....	129
BIBLIOGRAFÍA.....	143

## INTRODUCCIÓN

La orientación actual de la economía está definida por el proceso de Globalización que se instaura a partir de los 80 y que CEPAL (2002) define como "la creciente gravitación de los procesos económicos, sociales y culturales de carácter mundial sobre aquellos de carácter nacional y regional".

Desde la década de los ochenta en Chile ha tenido lugar un importante crecimiento económico, lo cual ha ido acompañado de un considerable desarrollo agrícola de sus cuencas así como de una ampliación de sus ciudades interiores y costeras (CASTRO, 2007). Es importante destacar que el desarrollo económico acaecido en Chile, especialmente en territorios de notoria vocación exportadora estaría conllevando relevantes consecuencias ambientales como la degradación morfoedafológica.

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. 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, 1991).

Entre los problemas ambientales de Chile se reconoce que los procesos erosivos constituye, el problema 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 constituye en la actualidad uno de los mayores problemas ambientales relacionados con el campo silvoagropecuario, especialmente porque es un recurso no renovable a escala humana y dada la propia actividad humana siendo un proceso en la actualidad creciente (CIREN, 2009).

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 óptimo a utilizar), podría traer como consecuencia, pérdida del

recurso suelo, implicando una grave intervención en la dinámica de las laderas permitiendo que ante un eventos 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).

La presente investigación se centra en la identificación, la clasificación y el análisis de procesos erosivos y su influencia sobre el valle del río Aconcagua empleando como metodología aquella propuesta por MÄRKER *et al.* (2001). El presente estudio es importante en la comprensión de los procesos erosivos ocurridos en el valle y la afectación experimentada como consecuencia del proceso de modernización agrícola, para lo cual se estableció como área testigo la subcuenca hidrográfica ocupada por la Comuna de Llay-Llay que permitirá realizar la validación del comportamiento erosivo de la superficie total de la cuenca, considerando características físico-naturales que interactúan en la geodinámica propia del paisaje.

Las ERU's (*Erosion Response Units*) se han definidos como "la distribución de las unidades tridimensionales del terreno, que están heterogéneamente estructuradas; cada uno de ellos posee características homogéneas en cuanto a los procesos dinámicos de erosión, pero con una

variación ligera dentro de la unidad al compararlo con los vecinos. Ellos están controlados por sus propiedades fisiográficas y el manejo de su ambiente natural y humano” MÄRKER *et al.* (2001).

El estudio de la degradación morfoedafológica a través de la determinación de las Unidades de Respuesta a la Erosión (ERU's) permite la integración de información acerca de la distribución espacial y temporal de los fenómenos erosivos del suelo dentro de una cuenca de un río, permitiendo también la modelación de los diferentes procesos de erosión activos dentro de la misma cuenca, MÄRKER *et al.* (2001). La problemática de la erosión consecuentemente, requiere del reconocimiento de los procesos erosivos y de sus causas, de modo de poder fijar políticas de conservación que consideren la aplicación futura de medidas de mitigación a impactos considerando sus principales causas, proponiendo medidas de recuperación a través de una eficiente ordenación y gestión de los recursos naturales existentes en la cuenca hidrográfica.

## Capítulo 1 Erosión en Chile

La erosión es definida como el proceso de degradación, transporte y deposición de materiales del suelo por efecto de agentes erosivos, tales como el agua, el viento o el hielo (PERALTA, 1993). Según ELLIES (2000), la erosión es quizás el proceso de degradación de suelos que causa un mayor impacto, ya que es irreversible, de gran magnitud.

Los agentes erosivos dinámicos, en el caso de la erosión hídrica son la lluvia y el escurrimiento superficial o las inundaciones. En el momento en que la precipitación pasa a ser mayor que la tasa de infiltración de agua en el suelo, se produce la retención y detención superficial del agua y, posteriormente, el escurrimiento superficial del agua que no infiltra (MEYER, 1976).

Las consecuencias de la erosión del suelo *in situ* son particularmente importantes en las tierras de usos agrícola, donde la redistribución y pérdida de suelo, la degradación de la estructura y el arrastre de materia orgánica y nutrientes, llevan la pérdida de espesor del perfil cultural y al descenso de la fertilidad (MORGAN, 1997). Para dicho autor, 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.

La degradación de los suelos se puede definir entonces, como una ruptura del equilibrio de las propiedades del suelo provocando la pérdida o disminución de la capacidad productiva del edafosistema. Reduce en consecuencia, la capacidad actual y/o futura del suelo de sostener vida humana y producir flujos de bienes y servicios sustentables en el tiempo y en última instancia puede causar la desertificación del territorio. Este proceso, si bien inicialmente fue natural, en rigor hoy en día es ocasionado por una explotación y manejo inadecuado, fenómenos inducidos y acelerados por el hombre, influenciado a su vez por factores económicos, políticos y sociales (CASANOVA *et al.*, 2004). Dentro de las manifestaciones de degradación del medio edáfico, la erosión es uno de los procesos de mayor impacto ambiental y socioeconómico en Chile, afectando en forma generalizada a todo el territorio (CONAMA, 1994).

Las grandes extensiones de terrenos erosionados en diversas formas y variables grados de intensidad que existen en Chile, están estrechamente ligados a la fragilidad de los ecosistemas. Entre los factores naturales que inciden en el deterioro, cabe destacar la topografía de lomas, cerros y montañas que se extienden sobre la mayor parte del territorio nacional. La Cordillera de los Andes está constituida por una gama de rocas ígneas, sedimentarias y mixtas, las que están sometidas a

enérgicos procesos de remodelamiento y por consiguiente a acciones de carácter erosivo, que incrementan el arrastre de sedimentos hacia la Depresión Central. Por su parte, la Cordillera de la Costa en los sectores central y sur del país presenta un alto grado de meteorización de su basamento rocoso, característica que favorece la formación de cárcavas (ESPINOZA *et al.*, 1994).

La pérdida del suelo en Chile, debido a la erosión, constituye un fenómeno dramático, debido a que se trata de un recurso natural, que en términos prácticos no es renovable. Esta pérdida muchas veces irrecuperable, condiciona en gran medida a casi todos los demás aspectos y expresiones del medio ambiente, que a su vez constituyen la base o cimiento del desarrollo sustentable. El fenómeno de la erosión, debido a claros factores históricos, económicos, y/o climáticos, ha tenido lugar, preferentemente en latitudes, correspondientes al territorio comprendido entre las regiones quinta y undécima, por muy largo tiempo (CORMA, 2005).

### **Relación entre el uso y manejo del suelo con erosión**

Para la conservación y recuperación de los suelos existe una serie de técnicas, siendo algunas de ellas adecuadas para pendiente ligeras y grandes explotaciones agrícolas, mientras que otras son de mayor utilidad para predios más pequeños y con pendientes mayores. En general, es en las

pequeñas explotaciones donde los problemas de erosión son de mayor envergadura (CARRASCO y RIQUELME, 2003).

Varios autores han señalado las ventajas técnicas de la cobertura del suelo y métodos de manejo de suelos como estructuras para el control del escurrimiento en terrenos en pendiente. De esta manera, los mayores éxitos en programas de conservación de suelos en tierras inclinadas se han obtenido con el concepto de *Agricultura de Conservación* (LAGOS, 2005), dirigida hacia tecnologías que aseguren mantener y mejorar la productividad, al mismo tiempo que preserven los recursos naturales.

Las prácticas de conservación de suelos que se ejecutan para evitar la pérdida de los suelos por causa de la erosión son muy diversas y deben ser relacionadas en función de la pendiente del terreno, del largo de ella, de la vegetación existente en cada lugar, y del costo. Obedecen a tres principios fundamentales: favorecer la cobertura vegetal del suelo, mejorar la infiltración del agua, y reducir o evitar que ella escurra sobre la superficie. Las técnicas más efectivas de conservación y recuperación de suelos, de acuerdo a (CARRASCO *et al.*, 2003) son:

*Técnicas vegetativas:* Se constituyen en medidas agronómicas para la conservación del suelo, utilizando el

efecto protector de las cubiertas vegetales para reducir la erosión. Debido a sus diferencias en cuanto a densidad y morfología, la capacidad de la vegetación para proteger el suelo es muy variable. Generalmente los cultivos en líneas son los menos efectivos y suelen provocar los mayores problemas erosivos debido al alto porcentaje de suelo desnudo que dejan, especialmente en las primeras etapas del cultivo (MORGAN, 1997). Dentro de las técnicas vegetativas se pueden mencionar las barreras vivas, los abonos verdes y la cero labranza, (CARRASCO y RIQUELME, 2003)

*Técnicas mecánicas:* Los métodos mecánicos se utilizan para controlar el movimiento del agua y del viento sobre la superficie del suelo. A decir de (CARRASCO y RIQUELME, 2003) se dispone de diferentes métodos como: subsolado en camellón, surcos de infiltración, canal de desviación de aguas lluvias, zanjas de infiltración, pircas y terrazas y andenes. La decisión de adoptar unos u otros depende de si el objetivo es reducir la velocidad de la escorrentía o del viento, aumentar la capacidad de almacenamiento de agua en la superficie del suelo o evacuar con seguridad los excesos de agua (MORGAN, 1997). Los métodos mecánicos se utilizan, normalmente, complementados con medidas agronómicas.

En la actualidad existen diversos métodos, técnicas y prácticas para el manejo y conservación de suelos en tierras inclinadas. Sin embargo, el énfasis generalmente ha sido puesto en obras físicas o estructuras de conservación de suelos dirigidas al control de escurrimientos superficiales de flujo concentrado, fundamentalmente a través de actividades para control de cárcavas y torrentes, así como en el tratamiento del terreno para el control del escurrimiento en pendientes, con el uso de muretes de piedras, terrazas de banco y diques de absorción.

Menor importancia se la ha otorgado a la diseminación y aplicación de prácticas de mejoramiento del suelo, cobertura del suelo y a la estructura de cultivos en pendiente; las cuales son más fácilmente adoptables por los agricultores dados su menor costo (LAGOS, 2005). Ellos han integrado e incorporado más fácilmente prácticas diarias de manejo agronómico del cultivo y se han orientado hacia el control de las causas originales de la erosión del suelo, es decir, a la reducción de la disgregación del suelo, su transporte y depositación.

Es probable que las más importantes prácticas, por los resultados a corto plazo que se obtienen y por ser el factor que más incide en las considerables pérdidas de suelo y productividad, son todas aquellas relacionadas con los sistemas de labranza que implican menos laboreo del

suelo (cero o mínima labor) en comparación con la labranza convencional (CARRASCO *et al.*, 2003).

Los resultados indican que con labranza convencional las pérdidas son dos, siete y diez veces mayores que con labranza mínima, cero y pradera natural, respectivamente (CARRASCO y RIQUELME, 2003).

Con el manejo adecuado del suelo se persigue mantener su fertilidad y estructura. Los suelos con elevada fertilidad proporcionan cultivos con altos rendimientos, buena cobertura vegetal y, como consecuencia, condiciones que permiten minimizar los efectos erosivos de la lluvia al caer, de la escorrentía y el viento (MORGAN, 1997). Estos suelos presentan, normalmente, una estructura granular estable que no se deteriora por el cultivo así como una elevada capacidad de infiltración. Por estas razones, la fertilidad puede verse como un aspecto clave en la conservación del suelo.

La conservación del suelo es un tema interdisciplinar que precisa de información sobre el riesgo de erosión, conocimiento de los procesos geomorfológicos que intervienen y de los factores que los controlan; conocimiento de los sistemas agrícolas y de la estructura social en que se desarrollan (CARRASCO *et al.*, 2003).

El suelo en condiciones normales siempre presentará tasas naturales de erosión que tienden a equilibrarse con las tasas de formación del mismo. La pérdida y disminución del suelo por erosión, como consecuencia del uso antrópico, se debe básicamente a factores económicos, sociales y culturales que derivan en la sobreexplotación del recurso empleando prácticas inadecuadas de manejo de suelos y aguas. Dado que la erosión se constituye en la principal amenaza para mantener la productividad a largo plazo en tierras agrícolas y forestales, resulta inminente el aplicar técnicas de manejo del suelo que permitan atenuar su impacto sin afectar su potencial productivo. Para lograr el éxito de la aplicación de medidas que mitiguen el impacto de la erosión se debe asegurar el establecimiento de prácticas conservacionistas, adaptadas al entorno, a la vez que se permita una amplia participación de la comunidad en la planificación y ejecución de los trabajos integrales. Se debe considerar que la rehabilitación de tierras totalmente degradadas involucra un cambio en el uso de la tierra así como la aplicación de prácticas de manejo muy costosas, por lo que es viable concentrar los esfuerzos en la mantención y conservación de las tierras productivas, en lugar de recurrir a obras de rehabilitación de suelos de alto costo y baja rentabilidad.

## **Modernización Productiva en el Valle del Aconcagua**

Chile en el último tiempo se ha caracterizado por ser exportador frutícola por excelencia con respecto al resto de los países latinoamericanos, transformándose los cultivos y plantaciones en un pilar importante del desarrollo económico y social. (CASTRO Y ESPINOSA, 2008).

Las plantaciones de frutales en laderas han tenido un desarrollo creciente en los distintos valles agrícolas de Chile. En el caso del valle del Aconcagua se ha introducido cambios de uso del suelo en ecosistemas que son altamente frágiles, tanto por el equilibrio entre los factores topográficos y vegetacionales como por constituir muchas veces en sitios con características relictuales, que mantienen una importante biodiversidad y en otros casos, corresponden a zonas donde los suelos se han recuperado, después de procesos largos y costosos

Desde mediados de los años sesenta, el valle del río Aconcagua comenzó a especializarse en la producción frutícola de exportación y en la producción de conservas para el mercado interno, lo que lo convirtió en el caso más exitoso de modernización en agroexportación de fruta, (PNUD, 2008). Posteriormente, los profundos cambios políticos y económicos de 1973 impactaron directamente en la reorientación de la propiedad de las tierras a nivel local. El nuevo marco instaurado por el gobierno militar

permitió la instalación de grandes empresas, las que a mediados de los años setenta ya habían conformado el patrón de tenencia de la tierra que se ha consolidado hasta el presente. La nueva distribución de las propiedades no reproduce los antiguos cánones de explotación rural, sino que ensaya progresivamente los preceptos liberales en sus modelos productivos. Este modelo de modernización logra rápidamente elevados niveles de rentabilidad, al tiempo que genera un nuevo patrón laboral basado ahora en la “temporalidad” de su mano de obra.

El desarrollo productivo ocurrido entre 1982 y 1997 se sustentó sobre la articulación económica de tres actores: los exportadores, los productores frutícolas y los trabajadores temporeros. Actualmente, el valle se define por las grandes inversiones en carreteras, caminos y comunicaciones, que conectan las ciudades, los pueblos periurbanos y los pueblos rurales en torno a esta gran producción agroindustrial (PNUD, 2008).

La cuenca del río Aconcagua, en un ambiente húmedo, se ha incorporado en los últimos años al proceso de modernización agrícola sufriendo un acelerado proceso de cambio en el uso del suelo y de expansión de su frontera agrícola, como también un significativo proceso de expansión de sus áreas urbanas, que en algunos casos

está generando conurbaciones. Esto debido a la excelente calidad de sus suelos y de sus condiciones climáticas (ALIAGA Y LEYTON, 2007).

En el valle del Aconcagua es posible apreciar la utilización de distintos niveles tecnológicos, por ejemplo, las comunas que poseen una menor superficie cultivable, han ido desarrollando nuevas técnicas de cultivos, como son el uso de las laderas de cerros y rinconadas, Tabla 1. Lo anterior se ha debido principalmente al buen clima que presentan ciertas comunas, como por ejemplo en Panquehue, donde sus laderas están libres de heladas y al buen manejo de los sistemas de regadío, los que han ido incorporando nuevas técnicas, como lo es el riego por goteo (GONZÁLEZ *et al.*, 2006).

Tabla 1: Superficies (ha) de frutales en valle Aconcagua por clases de pendiente

<b>PENDIENTE</b>	<b>POTENCIAL</b>	<b>ACTUAL</b>	<b>TOTAL</b>	<b>PORCENTAJE %</b>
08 - 15%	310.9	1672.1	1983	18.7
15 - 30%	444.4	4034.2	4478.6	42.3
30 - 45%	210.9	2333.4	2544.3	24
45 - 60%	126.4	865.2	991.6	9.4
> 60%	97.4	493.4	590.8	5.6
<b>TOTAL</b>	<b>1190.0</b>	<b>9398.3</b>	<b>10588.3</b>	<b>100.0</b>

Fuente: CIREN (2007)

En el valle del Aconcagua, 3.692,0 has que representan el 39,3%, se encuentran en zonas con pendiente mayor o

igual a 30%, mientras que la superficie reemplazada por matorrales semidensos y densos es de 4.015,7 has, equivalente al 42,7% de la superficie en la cuenca (CIREN, 2007). Tabla 2.

Tabla 2. Superficie (ha) frutales en Aconcagua, según cobertura vegetal sustituida

DESCRIPCIÓN DE VEGETACIÓN	EN PREPARACIÓN	PLANTADA	TOTAL	PORCENTAJE
Cajas de Ríos		12.5	12.5	0.1
Ciudades-Pueblos-Zonas Indust.		44.3	44.3	0.4
Matorral abierto	250.6	3122.3	3372.9	31.9
Matorral Arborescente Muy Abierto		98.8	98.8	0.9
Matorral Arborescente Semidenso	155.5	816.1	971.5	9.2
Matorral Arborescente Abierto	71.2	219.8	291.0	2.7
Matorral Arborescente Denso	12.3	78.3	90.6	0.9
Matorral Denso	88.5	251.2	339.7	3.2
Matorral Muy Abierto	233.5	1129.6	1363.1	12.9
Matorral Semidenso	248.2	2716.2	2964.4	28.0
Matorral-Suculenta Muy Abierto	28.7	7.0	35.7	0.3
Matorral-Suculenta Abierto	49.3	160.0	209.3	2.0
Matorral-Suculenta Semidenso	0	216.8	216.8	2.0

Planta Joven- Recién Cosechada		142.7	142.7	1.3
Plantación	7.5	21.1	28.5	0.3
Praderas Anuales	1.4	25.2	26.6	0.3
Renoval Abierto	8.1	44.6	52.7	0.5
Renoval Denso		54.0	54.0	0.5
Renoval Semidenso	12.2	99.9	112.0	1.1
Rotación Cultivo- Pradera	23	76.9	99.9	0.9
Terrenos de Uso Agrícola		61.3	61.3	0.6
<b>TOTAL GENERAL</b>	<b>1190.0</b>	<b>9398.6</b>	<b>10588.3</b>	<b>100.0</b>

Fuente: CIREN (2007)

El sistema de manejo aplicados en los cultivos de ladera, que implica la limpieza total antes de establecer la plantación, la aplicación de herbicidas para manejar el crecimiento de malezas sumado a un desconocimiento y desinformación por parte de los agricultores en cuanto a la elección del método de preparación y siembra más eficiente a emplear tendría como resultado la pérdida del recurso suelo, (CASTRO Y ESPINOSA, 2008).

La intervención en la dinámica de las laderas de los cerros se evidencia cuando al producirse eventos de precipitación el agua lleva consigo sedimentos, que al ser depositados, repercutirían con efectos negativos a las plantaciones que se ubican en los fondos de valle así como a obras e infraestructura civil como canales de riego y a los propios cursos fluviales existentes.

El proceso de modernización productiva agrícola del valle del río Aconcagua a través del tiempo ha generado un cambio profundo en cuanto a la selección y ubicación de las plantaciones productivas. De esta manera y como consecuencia de la escasez y del alto precio de los suelos que se sitúan en el fondo de valle se ha expandido la frontera agrícola, ocupando actualmente áreas correspondientes a las laderas de los cerros. Sin embargo, se debe señalar que las áreas de laderas ofrecen un claro efecto positivo para los frutales al reducir las heladas que afectan de manera importante a las áreas que se ubican en el fondo de valle, permitir el desarrollo de una nueva arquitectura radicular a la planta, en especial a los paltos y en definitiva, aumentar el espacio productivo en determinados suelos que ofrecen una mayor productividad que la original. Cabe destacar que en estas nuevas áreas de plantación es común observar dentro de las labores, la ausencia de las buenas prácticas de conservación y manejo del recurso suelo.

La cuenca del río Aconcagua se desarrolla en el extremo sur de los valles transversales, en la V Región (Región de Valparaíso). Su extensión alcanza a aproximadamente 7.200 km<sup>2</sup> y su rumbo general es de Este a Oeste (SAG, 2005) (Fig. 1).

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. Sus más caudalosos afluentes los recibe por su ribera norte y todos sus tributarios formativos asientan sus cabeceras en el interior de la cordillera andina, en un sector donde ésta alcanza elevaciones excepcionales, como son los cerros Juncal (6.110 m); Alto de Los Leones o Cabeza de León (5.400 m) y el macizo del Aconcagua (7.021 m). El río Aconcagua se forma de la unión, en la Cordillera de Los Andes, a 1.430 m de altitud, de los ríos Juncal, que proviene del oriente y el Blanco, que viene del sureste. Desde la junta con el río Blanco, el río Aconcagua recorre 142 km hasta su desembocadura en la bahía de Concón en el Mar Chileno. Sin embargo, si se considera el desarrollo del río Juncal desde su nacimiento, el recorrido alcanza a 177 km, (CADE IDEPE, 2003).

El uso agrícola en la cuenca comprende 86.237 has equivalentes al 12% de la superficie total. Además, comprende 586 has de terrenos cuyo uso se destina a rotación cultivo-pradera. Los terrenos agrícolas se presentan prácticamente a lo largo de todo el valle del río Aconcagua. En el sector alto, las zonas agrícolas están presentes próximas al río Putaendo y al estero Pocuro; en el sector medio, próximas al estero Los Loros y en el sector bajo de la cuenca, la superficie agrícola se presenta próxima al estero Limache, (CADE IDEPE, 2003).

La cuenca en su conjunto produce el 41% del total de paltos del país, 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 que la producción en su gran mayoría es exportada, han provocado un aumento de erosión y de pérdida de vegetación natural, sin que existan manejos adecuados para evitar la degradación (ALIAGA y LEYTON, 2007).

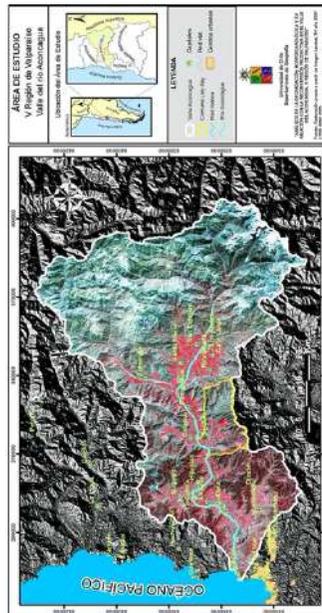
### **Área Testigo. Subcuenca de la comuna de Llay-Llay**

Dentro de la superficie total del valle del Aconcagua se ha considerado seleccionar un área específica de estudio que corresponde a la subcuenca de la comuna de Llay-Llay con el ánimo de validar el modelo de vulnerabilidad a la erosión de acuerdo a (MÄRKER *et al.*, 2001). La comuna de Llay-Llay se constituye en una subcuenca que se presenta como una muestra representativa del valle del Aconcagua que reúne características edafoclimáticas presentes en gran parte del valle del río Aconcagua. Es importante indicar que estudios actuales del CIREN (2009) establecen en la comuna de Llay-Llay importantes niveles de erosión clasificados en altos y muy altos. Por otra parte debe destacarse que un 15% de la superficie de la subcuenca de la comuna de Llay-Llay que se encuentra conformada por cultivos agrícolas mientras que un 3%

corresponde a plantaciones de paltos que se ubican en las laderas que rodean el fondo de valle de la comuna.

La Comuna de Llay-Llay tiene una ubicación geográfica de 32° 50' de latitud sur y de 70° 59' longitud oeste, constituye el límite poniente de la provincia de San Felipe y es la puerta de comunicación de ésta con el Valle Central de la V Región. Limita al poniente con las comunas La Calera, Hijuelas y Nogales; al oriente con Putaendo, San Felipe y Rinconada; al norte con la comuna de Cabildo y al sur con el límite de la provincia de Santiago. Comprende una superficie de 349 km<sup>2</sup>, siendo su área urbana de 2.88 km<sup>2</sup> y su área rural de 346.12 km<sup>2</sup>.

Figura 1: Área de estudio, valle del río Aconcagua, subcuenca comuna de Llay-Llay



Fuente: Elaboración propia a partir de DEM ASTER 2009, Imagen LANDSAT ETM 2007 e IGM 2009

## **Antecedentes del Sistema Físico Natural del valle del Aconcagua**

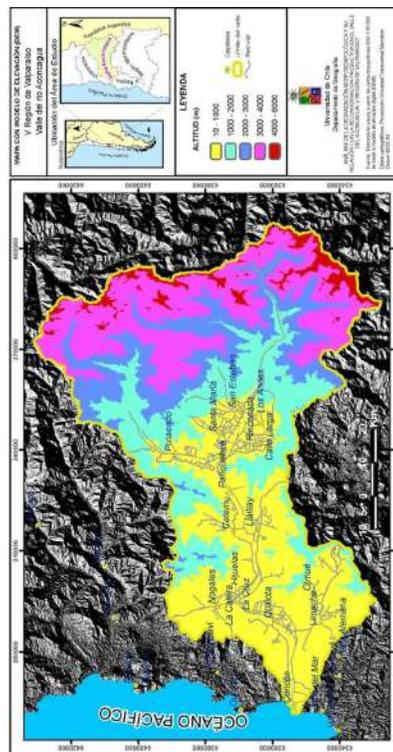
Los climas presentes en la cuenca del río Aconcagua corresponden a: Templado de tipo Mediterráneo con estación seca prolongada y Frío de altura en la Cordillera de los Andes (CADE IDEPE, 2004). Los distritos agroclimáticos establecidos por el Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN) en el año 1989 clasifica dos períodos de tiempo dentro del año, de acuerdo a la cantidad de precipitación que recibe el valle.

En el período comprendido entre los meses de junio – agosto la precipitación fluctúa entre los 150 mm a los 396 mm. Dentro de este período el distrito que más precipitación recibe es el de Casablanca – valle norte R-O Maipo, con una cuota de 396 mm correspondiente un pequeño sector de la Comuna de Quilpué, mientras que la menor cantidad de precipitación (150 mm), que se concentra en este período del año se da en el distrito valle R-O Aconcagua – Los Andes, SD. San Felipe y a cuyo sector de influencia pertenece a las comunas de Panquehue, Rinconada, Calle Larga, Los andes, San esteban, Santa María y San Felipe (Fig. 2 y Tabla 3).



El relieve del valle está marcado por su amplio rango altitudinal que inicia desde los 10 msnm en la comuna de Concón y llega hasta los 5.900 msnm en las comunas de Putaendo, San Esteban y Los Andes, (Fig. 3). De acuerdo al informe realizado por la DGA (2004) el valle del Aconcagua se enmarca dentro de los valles transversales, los mismos que califican como Cuencas Transicionales Semiáridas.

Figura 3: Carta altitudinal

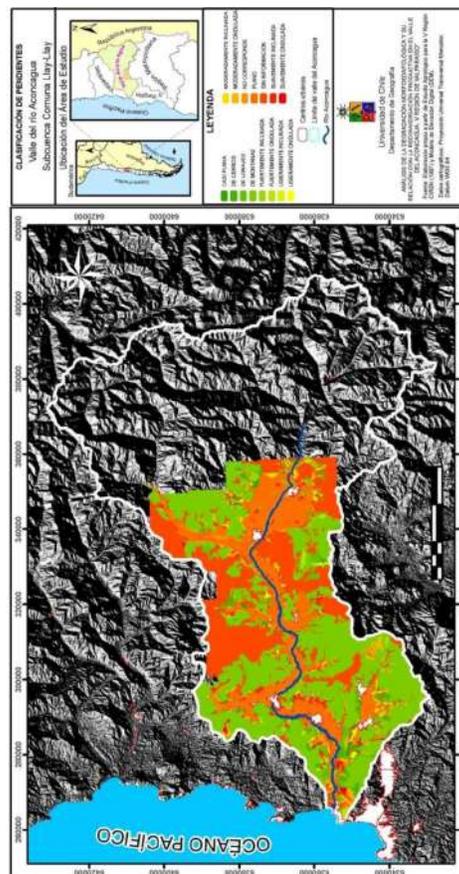


Fuente: Elaboración propia a partir de DEM ASTER 2009

El amplio rango altitudinal existente a lo largo de la superficie del valle transversal del Aconcagua ha

determinado la presencia de variadas pendientes. En este sentido el Estudio Agrológico para la V Región desarrollado por el CIREN (1997), estableció que un 14% de la superficie del valle que abarca este estudio corresponde a suelos “planos” mientras que un 42% se corresponde con áreas de montañas y un 24% aparece sin información. En menor proporción se observa la presencia de otras clases de pendiente como cerros, lomajes, etc. (Fig. 4 y Tabla 4).

Figura 4: Clases de pendientes



Fuente: Elaboración a partir de CIREN (1997)

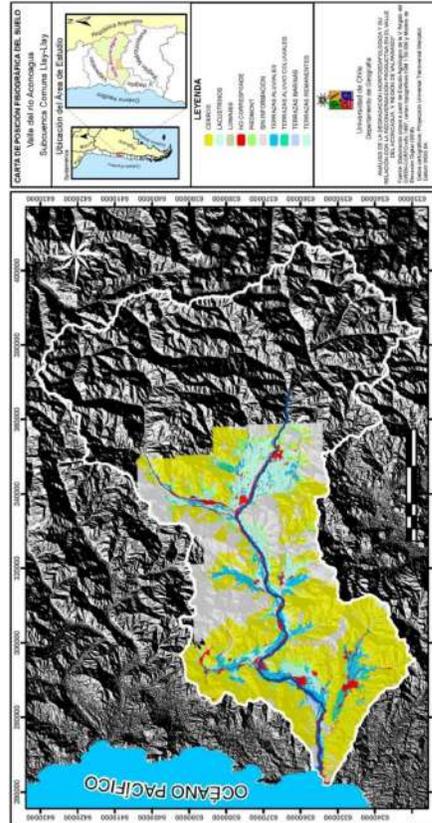
Tabla 4. Distribución clases de pendientes

Clase de Pendiente	Área (ha)	%
Casi plana	4016,89	0,92
Cerros	7926,12	1,81
Lomajes	12859,99	2,93
Montañas	187033,87	42,65
Fuertemente inclinada	2971,63	0,68
Fuertemente ondulada	3149,97	0,72
Ligeramente inclinada	1413,36	0,32
Ligeramente ondulada	1891,48	0,43
Moderadamente inclinada	4241,84	0,97
Moderadamente ondulada	8544,08	1,95
No corresponde	26001,60	5,93
Plano	61927,79	14,12
Sin Información	107314,80	24,47
Suavemente Inclinada	5707,81	1,30
Suavemente ondulada	3553,99	0,81
TOTAL	438555,23	100,00

Fuente: CIREN (1989)

Un aspecto importante a destacar dentro de las características físicas naturales del valle del Aconcagua es la posición fisiográfica que ocupa el paisaje que constituye la superficie del valle. En este sentido el Estudio Agrológico para la V Región desarrollado por el CIREN-CORFO en el año 1997, establece que del 60% de la superficie del valle considerada, el 50% se encuentra ocupado por formaciones de cerros, mientras que un 13% corresponde al fondo de valle y un 4% a formaciones de piedmonts como se puede apreciar en la Fig. 5 y Tabla 5.

Figura 5: Posición fisiográfica del paisaje



Fuente: elaboración en base a CIREN, 1997

Tabla 5. Posición fisiográfica que ocupa la vegetación

Posición Fisiográfica	Km <sup>2</sup>	%
Cerros	2194,63	50,04
Lacustrinos	108,08	2,46
Lomajes	8,07	0,18
No corresponde	260,02	5,93
Piedmont	193,27	4,41
Sin información	1073,15	24,47
Terrazas aluviales	244,18	5,57
Terrazas aluvio coluviales	29,37	0,67
Terrazas marinas	23,72	0,54
Terrazas remanentes	251,07	5,72
<b>Total</b>	<b>4385,5523</b>	<b>100,00</b>

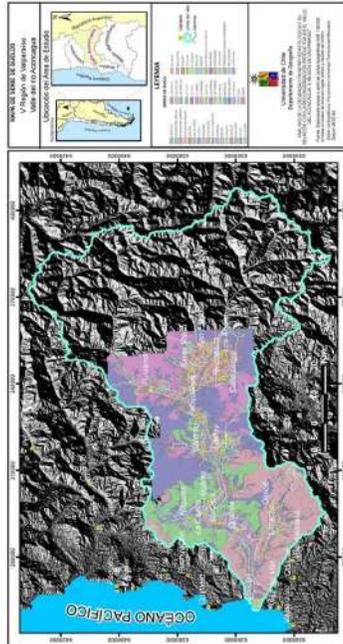
Fuente: CIREN (1997)

La cuenca del río Aconcagua posee unidades taxonómicas correspondientes básicamente a suelos anfisoles, inceptisoles y molisoles, que se constituyen en los mejores suelos de la zona y se caracterizan principalmente, por presentar perfiles profundos, bien desarrollados, de texturas medias a finas, de buena estructura y planos suavemente ondulados. Los suelos de estas características se localizan en los sectores del estero Pocuro, Curimón, Catemu, Las Chilcas y en La Calera.

Dentro del Estudio Agrológico de la V Región realizado por el CIREN-CORFO (1997) se establecen las series de suelo que describen las características del suelo del valle del Aconcagua, (Fig. 6).

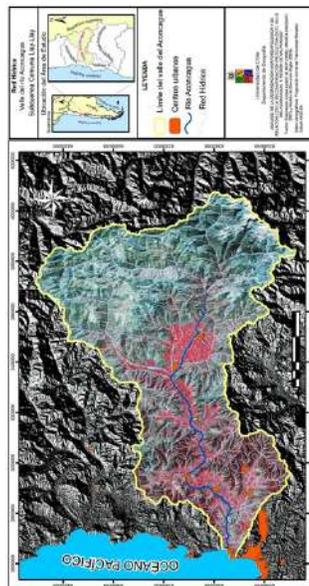
En lo relacionado con la red hídrica el eje principal es el río Aconcagua que nace de la alta cordillera, recorre el valle en sentido horizontal para desembocar en el océano Pacífico, a través de la comuna de Concón. Además del río Aconcagua, en el valle existen numerosos cursos inferiores de agua que se distribuyen en toda su superficie (Fig. 7).

Figura 6: Serie de Suelos



Fuente: Elaboración en base a CIREN-CORFO, 1997

Figura 7: Red Hídrica



Fuente: Elaboración a partir del MOP, 2009

### **División política y red vial del valle del Aconcagua**

En cuanto a su división político administrativa, el valle del Aconcagua se encuentra constituido por cinco provincias que reúnen veinticinco comunas, tal como se aprecia en la Fig. 8 y la Tabla 6.

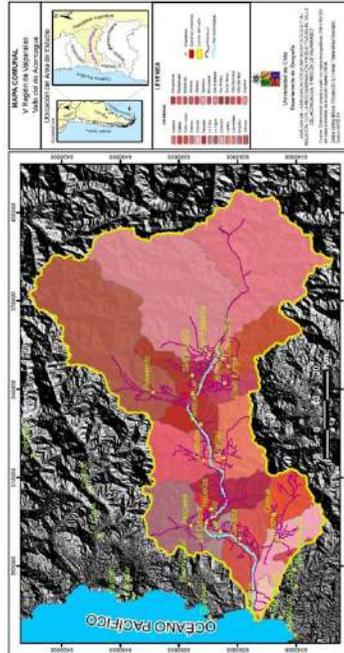
Tabla 6. División política del valle Aconcagua

<b>Provincia</b>	<b>Comuna</b>
Los Andes	Calle Larga
	Los Andes
	Rinconada
	San Esteban
Petorca	La Ligua
	Zapallar
Quillota	Calera
	Hijuelas
	La Cruz
	Limache
	Nogales
	Olmue
	Quillota
San Felipe de Aconcagua	Catemu
	Llaillay
	Panquehue
	Putendo
	San Felipe
	Santa María
Valparaíso	Concón
	Puchuncaví
	Quilpué
	Quintero
	Villa Alemana
	Viña del Mar

Fuente: MOP (2009)

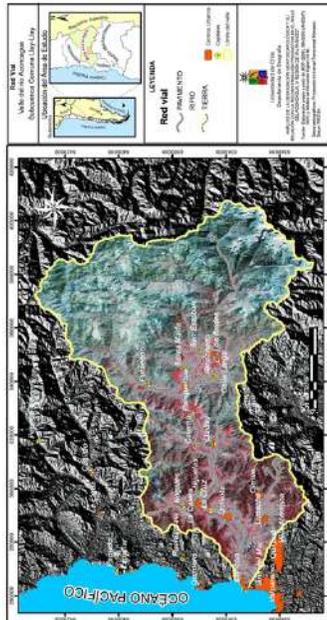
La red vial del valle Aconcagua la compone una gran extensión de carreteras de primer y segundo y tercer orden con carpeta de asfalto, ripio y tierra que conectan la gran mayoría de las comunas del valle entre sí y con el resto del país (Fig. 9).

Figura 8: División comunal



Fuente: Elaboración a partir del MOP, 2009

Figura 9: Red vial



Fuente: Elaboración a partir del MOP, 2009

### Uso del Suelo del valle del Aconcagua

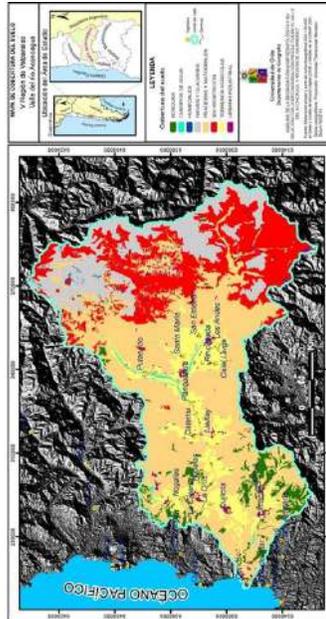
Los tipos de vegetación presentes en el valle del Aconcagua de acuerdo al Catastro de Bosque Nativo para la V Región desarrollado en el año 2001 por parte de la CONAF y CONAMA, muestra que el uso de suelo para ese año correspondía en un 46% a praderas y matorrales, un 12% de la superficie del valle tenía relación con los terrenos agrícolas mientras que sólo un 4% estaba constituido por bosques, (Fig. 10 y Tabla 7).

Tabla 7. Cobertura del Suelo año 2001

USO DEL SUELO	AREA (ha)	PORCENTAJE (%)
BOSQUES	31266.46	4.244
CUERPOS DE AGUA	4202.67	0.570
HUMEDALES	2524.95	0.343
NIEVES Y GLACIARES	100418.26	13.629
PRADERAS Y MATORRALES	345921.71	46.951
SIN VEGETACION	154682.22	20.995
TERRENOS AGRICOLAS	88374.50	11.995
URBANO INDUSTRIAL	9381.61	1.273
TOTAL	736772.38	100.000

Fuente: CONAF-CONAMA (2001)

Figura 10: Usos del Suelo



Fuente: Elaboración en base a CONAF-CONAMA, 2001

A comienzos de la década del '80, Chile comienza a experimentar un proceso de modernización rural, estimulado por las políticas macro-económicas de ajuste frente al imperativo de insertar al país en la economía global.

Las medidas adoptadas por Chile a mediados de la década de los años 80, con el propósito de aprovechar las ventajas comparativas de sus recursos se concretizan en un proceso de modernizaciones que transformaron no sólo el desarrollo de los centros tradicionales de crecimiento, sino que permitieron que muchas áreas que no tenían vocación exportadora se incorporaran competitivamente

al proceso de especialización de sus productos (DAHER, 1994).

La globalización de la economía implica que las regiones, las actividades económicas y las empresas queden expuestas a los imperativos del modelo y a las determinaciones del comercio internacional, obligando a la modernización, a la innovación tecnológica y a la reconversión productiva, todo lo cual orienta una modificación de las jerarquías territoriales (RIFFO, 1998).

La modernización productiva además, produce otros cambios como modificaciones en el patrón de uso de suelo, en la tenencia de la tierra, en el empleo, generando una movilidad de la mano de obra y la incorporación de la mujer en el mercado laboral, cambios en el patrón de los asentamientos rurales y nuevas actividades relacionadas al mundo rural.

Desde la década de los ochenta se vienen realizando en la zona central del país, plantaciones de frutales y viñas en laderas de cerros y piedmonts. Esta práctica de uso de terreno con pendientes de 45° o más, es común en regiones con escasa pluviometría y fuerte potencial de radiación solar, como la III y IV Regiones, en donde existen considerables extensiones de plantaciones, especialmente viñas de uva pisquera y de mesa, hoy también con paltos y cítricos. En las últimas décadas esta

superficie se ha ampliado a regiones como la III, IV, V, RM y VI, cubriendo miles de hectáreas con sistemas de riego tecnificado en suelos de ladera (RUIZ, 2005).

Las plantaciones de frutales en laderas han tenido un desarrollo creciente en los distintos valles agrícolas del país, introduciéndose cambios de uso del suelo en ecosistemas que son altamente frágiles, tanto por el equilibrio entre los factores topográficos, vegetacionales y el suelo, como por constituir muchas veces, especialmente en las zonas costeras, sitios con características relictuales, que mantienen una importante biodiversidad, y en otros casos, corresponden a zonas donde los suelos se han recuperado, después de procesos largos y costosos (CIREN, 2007).

En Chile se presenta una cercana relación a través de la superficie del suelo que se encuentra sujeta a eventos y procesos erosivos y la vulnerabilidad de los ecosistemas (ALIAGA Y LEYTON, 2007). Los elementos que tienen incidencia en la degradación del suelo son la conformación topográfica de lomas junto al insustentable uso y manejo del suelo y agua. Por otra parte el sistema cordillerano de Los Andes se encuentra soportando una elevada acción erosiva que repercute en el transporte de sedimentos hacia el sector de las planicies mientras que la

Cordillera de la Costa que registra un elevado índice de meteorización da paso a la conformación de cárcavas.

La presente investigación se centra en la identificación, la clasificación y el análisis de procesos erosivos y su influencia sobre el valle del río Aconcagua empleando como metodología aquella propuesta por MÄRKER *et al.* (2001). Este estudio es importante en la comprensión de los procesos erosivos ocurridos en el valle y la afectación experimentada como consecuencia del proceso de modernización agrícola para lo cual se establecerá una subcuenca representativas de la zona que permitan realizar una validación de la susceptibilidad erosiva de la cuenca, definida por el modelo señalado.

### **Cobertura del suelo**

La cobertura vegetal protege al suelo de la erosión puesto que intercepta las gotas de lluvia, absorbiendo la energía cinética de éstas, sin que causen desprendimiento de partículas del suelo (CUEVAS *et al.*, 2004).

Esta cobertura se considera como un evento detonante en los procesos de erosión, así la desaparición de toda la vegetación es probablemente, lo peor que pueda ocurrirle al suelo (DONOSO, 1992).

La eficacia de una cubierta vegetal para reducir la erosión por impacto de las gotas de lluvia depende, sobre todo, de la densidad de su cobertura sobre el suelo de la altura y continuidad de la vegetación (MORGAN, 1997).

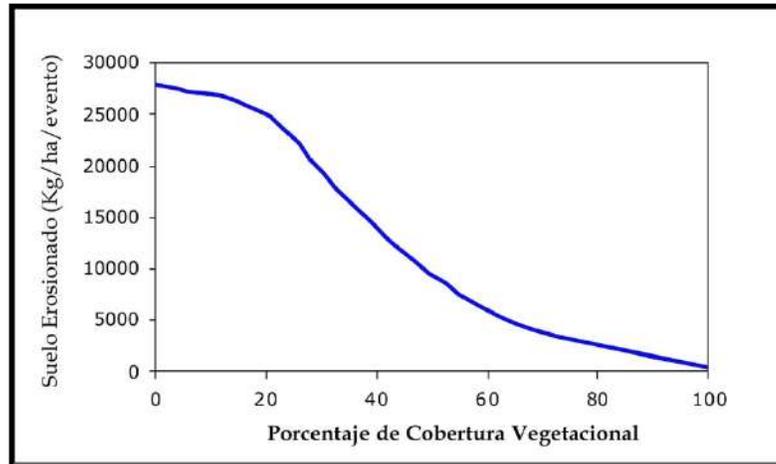
Adicionalmente, existen otros procesos que interactúan entre las plantas y el suelo que afectan la erosión, haciendo disminuir la pérdida de suelo, y que según LAL (1988), podrían resumirse en:

- El ligamiento físico del suelo con tallos y raíces.
- La unión electroquímica y de nutrientes entre la raíz y el suelo.
- La disminución del escurrimiento por la acción de los tallos, cañas, hojas y el mantillo de material orgánico.
- La infiltración a través de los canales de raíces.
- La mejor estructura y retención de agua, a consecuencia del aumento del contenido de materia orgánica.
- El incremento de la fauna y la actividad biológica que promueve una mejor estructura del suelo.

RAYMOND y HAMMER (1992) establecen una relación a través de la cual, la erosión decrece exponencialmente con el incremento de la cobertura vegetal bajo las mismas condiciones, como se aprecia en la Fig. 11. Se afirma de esta manera que la cobertura vegetativa es la

mayor herramienta conservacionista que reduce la erosión a niveles aceptables.

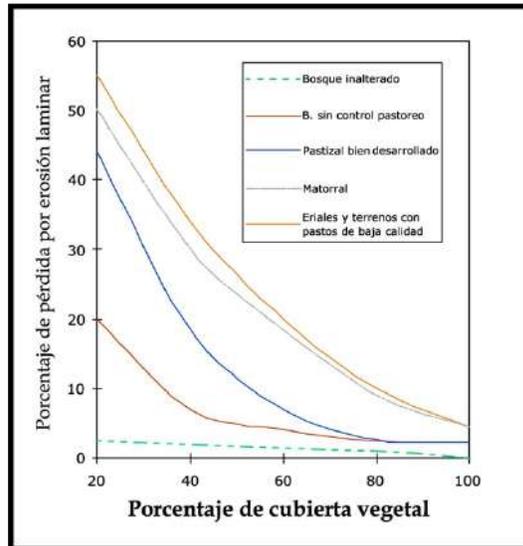
Figura 11. Tasas de erosión en relación con el porcentaje de cobertura vegetal



Fuente: RAYMOND y HAMMER, 1992.

Otros estudios relacionados con las tasas de pérdidas por erosión laminar en relación al efecto protector de los distintos tipos de vegetación es el que plantea LÓPEZ (1994). En la Figura 11 nótese que las pérdidas se producen en iguales condiciones de clima, suelo y relieve en un suelo desprovisto de vegetación y que no ha sido sometido a ninguna clase de cultivo. Estos resultados de la Figura 12, muestran una curva similar a la planteada por RAYMOND y HAMMER (1992), a excepción de la categoría de bosque inalterado.

Figura 12. Erosión laminar en relación con distintas coberturas vegetacionales



Fuente: LÓPEZ (1994)

De manera general, existe una relación inversamente proporcional entre las tasas de erosión y la cobertura vegetal siendo esta relación válida para todos los tipos de vegetación. Un pastizal bien desarrollado puede diferir muy poco (2% de pérdida) frente a un bosque inalterado, ambos con un 100% de cubierta vegetal (LÓPEZ, 1994).

Así, una buena cubierta vegetal, como un pastizal, un matorral, un bosque espeso o una combinación de ellos, compensa los efectos del clima, de la topografía y del suelo en la erosión (EUGENIN, 2004).

### Textura del suelo

La textura del suelo se refiere a la proporción relativa en que se encuentran las diferentes partículas que forman el suelo, a saber: arcilla, limo y arena (RUIZ, 2005),

constituyéndose en un factor importante para la regulación del agua y del aire presente en el suelo, y por tanto en el grado de permeabilidad, el cual influye en mayor o menor grado en la erosión del suelo.

HONORATO (1993) señala que la textura se presenta como una expresión cualitativa y cuantitativa del tamaño de las partículas. Cualitativa ya que guarda relación con el tamaño y la naturaleza de los constituyentes y cuantitativa debido a que se presenta como una expresión porcentual. Se considera que la textura constituye en una propiedad que está estrechamente vinculada con la composición mineral, el área superficial específica y el espacio de poros del suelo, (CASANOVA *et al.*, 2004). La textura del suelo ejerce influencia a través del movimiento y la disponibilidad del agua del suelo, la aireación, la disponibilidad de nutrientes así como también otorga resistencia a la penetración de las raíces de las plantas. Adicionalmente la textura del suelo presenta marcada afectación sobre las propiedades físicas emparentadas con la vulnerabilidad del suelo a la degradación, tal como es la agregación.

Las propiedades relacionadas con el tamaño de las partículas del suelo están determinadas por la distribución individual de las partículas en una muestra de suelo. En

este sentido partículas con un tamaño menor a 2 mm se dividen en tres tipos de textura al interior del suelo; arenoso, limoso y arcilloso, constituyendo los diferentes grupos texturales. El porcentaje de cada grupo textural dentro del suelo tiene un gran efecto en la retención de agua.

Dicho lo anterior la textura se puede agrupar en cuatro clases fundamentales, lo cual permitiría determinar a grandes rasgos las principales propiedades del suelo (CASANOVA, 2004), estas clases corresponden a:

Textura arenosa: caracteriza suelos aireados, pobres en reservas de agua y elementos nutritivos, y con baja capacidad de cambio catiónico e iónico.

Textura limosa caracterizada por un exceso de limo e insuficiencia de arcilla lo que puede provocar la formación de estructuras masivas y malas propiedades físicas.

Textura arcillosa, suelos ricos químicamente pero con malas propiedades físicas, mal aireados y mala permeabilidad, presentando dificultad para la penetración de raíces.

Textura franca, situación óptima ya que presenta la mayor parte de las cualidades de las texturas mencionadas anteriormente.

## **Índice Normalizado de las Diferencias Vegetacionales (NDVI)**

A decir de ALONSO *et al.* (1996), el NDVI 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). Es importante señalar que éste índice vegetacional permite diferenciar las conductas espectrales entre la vegetación vigorosa, bajo vigor, muerta y de suelo desnudo; realizando un cociente entre la diferencia de las bandas del Rojo R y del Infrarrojo Cercano IRC y la sumatoria de ambas (CHUVIECO, 2008), quien también indica que un aspecto de interés que posee este índice es que fluctúa entre valores conocidos, facilitando notablemente su interpretación. De allí que 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.

### **Dinámica de la Erosión**

La erosión siempre ha existido, y en tiempos geológicos pasados fue incluso mucho más activa. Antes de la colonización de los continentes por la vegetación las tasas de erosión debieron ser extraordinariamente altas (SCHUMM, 1977). En épocas históricas recientes también se registraron tasas de erosión elevadas a causa de la

puesta en cultivo de grandes superficies y a talas masivas. La erosión del suelo es definida como un proceso de desagregación, transporte y deposición de materiales del suelo por agentes erosivos (ELLISON, 1947 en PRADO *et al.*, 1994).

Según ELLIES (2000), la erosión es quizás el proceso de degradación de suelos que causa un mayor impacto, ya que es irreversible, de gran magnitud, y en casos extremos, puede provocar la pérdida total del suelo. La geomorfología y el régimen pluviométrico de Chile sitúan a la erosión hídrica como la primera causa de degradación de los suelos (CARRASCO y RIQUELME, 2003).

De manera similar, STOCKING en PRADO *et al.*, (1994) indica que la erosión provoca una disminución de la concentración de nutrientes en el suelo degradado remanente, siendo el suelo removido más rico en nutrientes en casi la totalidad de los casos.

Los procesos de erosión son muy variables en el tiempo y en el espacio siendo un problema a escala planetaria, Cuando la erosión se produce sin intervenciones antrópicas se la denomina erosión geológica o natural, y normalmente las tasas son bajas. Cuando el hombre altera estos procesos "naturales" se produce la erosión acelerada o antrópica, en la que las tasas son más

elevadas. Este último término es el que está relacionado con la desertificación del territorio porque no es sostenible para el suelo y además altera y degrada la vegetación, los flujos hídricos, la fauna, etc. Las tasas de erosión geológica son sostenibles pero las tasas de la erosión acelerada no permiten su regeneración, (CERDÁ, 2001).

La erosión del suelo consiste en tres fases: arranque, transporte y sedimentación del material. No hay erosión si no se producen las tres fases. Habitualmente se confunde meteorización - rotura o desintegración de la roca con erosión. La meteorización prepara el material para ser erosionado pero no lo moviliza, (CERDÁ, 2001).

El medioambiente es considerado complejo en donde los factores que lo componen no se comportan como entidades estáticas, sino 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).

Cambios en los sistemas naturales pueden ser predecibles y deberían ser reconocidos por cualquiera que esté trabajando en buscar soluciones a los problemas ambientales. En sistemas donde las entradas (inputs) son iguales a las salidas (outputs) no existe un cambio neto en el sistema y hablamos entonces de un sistema en estado

estacionario. Un estado estacionario puede ocurrir a escala global, tal como el balance entre la radiación solar que llega a la tierra y la radiación que se va de ella (ACUÑA *et al.*, 2007).

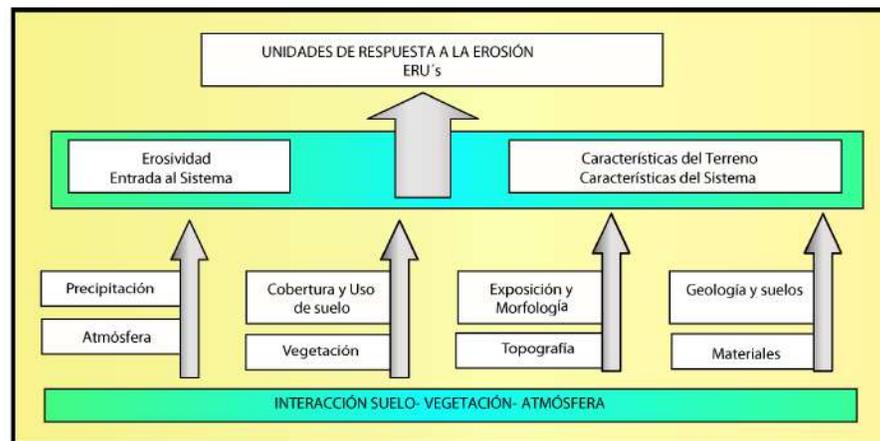
El reconocimiento de los procesos de retroalimentación positivos y negativos en los sistemas y el poder calcular el crecimiento de las tasas de transferencias y los tiempos de residencia, hará entonces posible hacer predicciones que podrán ser útiles para el manejo o la gestión ambiental.

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"*.

Según MÄRKER *et al.*, (2001) en FERNÁNDEZ (2006), la Interacción *Suelo – Vegetación – Atmósfera*, se manifiesta como un ecosistema que posee propiedades que regulan su actividad y que al ser estimulado, responde de manera específica. La sensibilidad de esta interacción depende de los factores ya que la dinámica

de los diferentes procesos erosivos se vincula con la asociación que exista entre ellos. Los factores de este intercambio se pueden dividir entre aquellos que entran al sistema como la erosividad causada por la precipitación y las características propias del terreno. Las superficies donde tienen lugar procesos erosivos con las mismas respuestas presentan asociaciones parecidas entre las entradas como la atmósfera y las características del sistema, lo cual el autor ha identificado como Unidades de Respuesta a la Erosión. (ERU's) (Fig. 13).

Figura 13. Interacción Suelo – Vegetación - Atmósfera



Fuente: MÄRKER *et al.*, (2001) en FERNÁNDEZ (2006)

La erosión del suelo comprende necesariamente tres fases que son: el arranque, transporte y sedimentación del material. En este sentido no existe erosión en ausencia de estas tres etapas. Con frecuencia se llega a confundir el proceso de meteorización, que conlleva la rotura o desintegración de la roca con el de erosión. Se debe

destacar que la meteorización es un proceso que prepara el material para ser erosionado, mas no lo moviliza. La erosión se presenta muy variables en el espacio y tiempo. A nivel global las tasas de erosión dejan ver un claro patrón en dependencia del clima, pese a que tienen marcada influencia la presencia de los grandes sistemas cordilleranos, en donde producto de las altas pendientes disminuyen las tasas de sedimentación mientras que aumentan las tasas erosivas. Al interior de una cuenca hídrica los procesos erosivos se dan a distintas escalas variando ampliamente sus tasas de erosión (LOVÓN, 2003).

### **Erosividad**

Según FERRANDO (1991) la *erosividad* equivalente a "*potencialidad erosiva*", responde a la energía erosiva de los factores externos. Corresponde a los eventos detonantes y al potencial de energía destructiva externa o energía de posición (pendiente, intensidad de la precipitación, etc.). De este modo las pérdidas de suelo están estrechamente relacionadas con la lluvia y su intensidad debido en parte por el poder de desprendimiento del impacto de las gotas al golpear el suelo así como por la contribución de la lluvia a la escorrentía. Derivado de lo anterior encontramos que se presenta una particular incidencia a la erosión por flujo

superficial y en regueros, fenómenos para los que la intensidad de precipitación se considera generalmente, la característica más importante.

La erosividad es una expresión de la capacidad de los agentes erosivos para provocar el desprendimiento y, transporte de las partículas del suelo (RENARD *et al.*, 1997). La fuerza que poseen los agentes erosivos y que causan el desprendimiento de las partículas del suelo y su posterior transporte es la erosividad (AGUIRRE, 2008). 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). 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 erosividad de la lluvia se debe en parte al impacto directo de las gotas de lluvia sobre la superficie del suelo y además al escurrimiento superficial que posteriormente provoca. La capacidad que tiene la lluvia para provocar la erosión de suelos es atribuida a la energía cinética de la lluvia, por lo tanto, la intensidad de ésta tendría una relación directa con la cantidad de suelo perdido (RENARD *et al.*, 1997).

Un elemento primordial para el desarrollo de la erosión es el clima, destacándose la lluvia por tener la capacidad de desplazar las partículas del suelo, de manera que en función de una creciente tasa de precipitación aumenta el tamaño de las gotas de lluvia y con ello su potencial erosivo se eleva. Es importante destacar que la agresividad de la lluvia o erosividad se encuentra funcionalmente relacionada con la energía cinética de la precipitación y por ende de la escorrentía que genera. Como se mencionara previamente, la tasa de erosión se relaciona con la intensidad de la lluvia cuando se producen eventos tormentosos intensos de corta duración que sobrepasan la capacidad de infiltración del suelo. De la misma manera se relaciona con la duración de las lluvias en caso de eventos de prolongada duración con poca intensidad, ya que concluyen de igual modo saturando el suelo y provocando un alto índice de escorrentía.

### **Erodabilidad**

La erodabilidad define la resistencia del suelo al desprendimiento y al transporte. Aunque la resistencia de un suelo a la erosión depende en parte de su ubicación topográfica, la pendiente, y otros factores, las propiedades del suelo son las más relevantes. La erodabilidad varía con la textura del suelo, la estabilidad

del agregado, la resistencia superficial al corte, la capacidad de infiltración y el contenido orgánico y químico (VERDUGA, 2007).

La *erodabilidad* por otra parte es la condición intrínseca o susceptibilidad de un determinado tipo de suelo a sufrir remoción y transporte de material por parte de los agentes erosivos (LIENLAF, 2003).

FERRANDO (1991), vincula la *erodabilidad* al concepto de "vulnerabilidad degradacional" correspondiendo esta última a la susceptibilidad natural o resistencia que presentan las distintas superficies o formas para ser erosionadas o degradadas, lo que depende de una gran variedad de factores internos.

Para BUTTERWORTH *et al.* (2000), las propiedades físicas del suelo varían a través de una serie de parámetros geomorfológicos. Por lo tanto, las formas del paisaje controlan la erosión pues ciertas unidades geomorfológicas se asocian a determinados tipos de suelo.

La erodabilidad del suelo expresa la influencia del perfil superior del suelo sobre la erosión mediante la resistencia tanto al arranque como al transporte de las partículas del suelo. La textura es una de las propiedades mayormente estudiadas en la identificación de los suelos en relación a

su susceptibilidad ante la erosión. Consecuentemente un suelo que cuenta con una buena agregación de sus partículas detiene el proceso de erosión ya que las estructuras se mantienen unidas permitiendo el movimiento de agua en su interior. El caso contrario ocurre cuando los agregados se distribuyen de manera irregular permitiendo de este modo que el sustrato se erosione al taponarse los poros del suelo provocando que el agua fluya en la superficie en lugar de infiltrarse.

### **Erosión Hídrica**

La erosión hídrica es la pérdida de suelo, implicando con ello la disminución o desaparición de minerales, materia orgánica y organismos, por remoción, transporte y depósito de las partículas, debido al arrastre producido por el agua de lluvia. La erosión hídrica es un proceso de disgregación y transporte de las partículas del suelo por la acción del agua (MOPT, 1992). La erosión hídrica superficial es muy perjudicial ya que se relaciona con la disminución de productividad del suelo, debido sustancialmente a la pérdida de materia orgánica de los horizontes superiores del mismo (CASAS, 2003).

La erosión hídrica se puede considerar una fuerza ecológica que influye sobre la composición de la vegetación y su patrón espacial al producir el desarraigo

de plantas y el arrastre de semillas y modificar las propiedades del suelo (GARCÍA, 2004).

Los mecanismos relacionados con la erosión hídrica de los suelos en laderas son tres: *el impacto de las gotas de lluvia, la acción de la escorrentía y los movimientos en masa*, GARCÍA (2004).

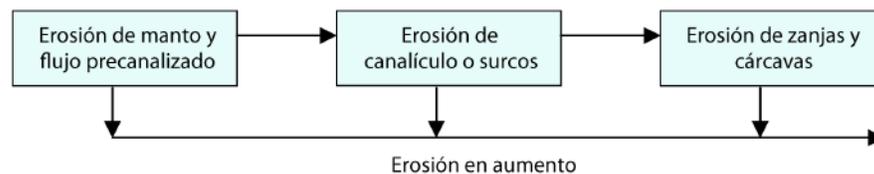
*Las gotas de lluvia* al impactar sobre el suelo desprotegido pueden romper los agregados que conforman la estructura superficial del mismo, transportando a distancia trozos de los mismos o las partículas minerales que los constituyen por efecto de la salpicadura. *La escorrentía* se produce cuando el suelo no es capaz de absorber toda el agua que está recibiendo en un momento dado y se origina un manto irregular de agua que fluye ladera abajo arrastrando las partículas desprendidas y arrancando a su vez nuevas partículas. Cabe destacar que la heterogeneidad de la escorrentía obedece a la propia irregularidad del terreno y en ocasiones ante la persistencia de la heterogeneidad espacial del agua conlleva a la formación de regueros e incluso cárcavas. Tanto en lo relacionado al impacto de las gotas de lluvia como a la acción de la escorrentía, el agua afecta a los primeros milímetros o centímetros del suelo, arrancando y arrastrando las partículas. No obstante, en los *movimientos en masa* el agua satura

hasta varios metros de profundidad al suelo o sedimentos, permitiendo que éstos se conviertan en un auténtico fluido viscoso que al exceder el punto de cohesión con el resto de los sedimentos de la ladera fluyan por efecto de la gravedad (CASAS, 2003).

La erosión hídrica 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). Luego de que las partículas son desprendidas, siguen un flujo superficial sin organización aparente, al que ARAYA-VERGARA (2002) denomina *sheet wash*. Finalmente este flujo es depositado en los suelos de menor pendiente.

Las principales formas de erosión hídrica, definidas en la Fig. 14, pueden ocurrir en forma conjunta en un mismo período de tiempo, sobre una superficie determinada, SANTIBÁÑEZ Y PÉREZ (1997) en ÁVALOS (2004).

Figura 14. Formas de erosión hídrica para algunos suelos bajo condiciones extremas de degradación



Fuente: SANTIBÁÑEZ Y PÉREZ (1997) en ÁVALOS (2004)

La erosión de *manto y flujo precanalizado* se refiere a la pérdida de las partículas más finas del suelo en forma pareja en la superficie afectada. Se produce por el arrastre de partículas debido a un escurrimiento generalizado en la superficie del suelo (DÍAZ, 2005). Puede ocurrir por una lluvia prolongada o porque la intensidad de ésta supera la capacidad de infiltración. MORGAN (1997) describe este flujo superficial como una masa trenzada de cursos de agua que no tienen canales marcados. Para ARAYA-VERGARA (2002) dicho flujo es la organización del escurrimiento en hilos de agua, formando un escurrimiento trenzado denominado *rill wash*.

La erosión de *canalículos o surcos* se produce cuando, al concentrarse los flujos precanalizados sobre pequeñas depresiones, adquieren la energía suficiente para formarlos. Se considera una etapa más avanzada de la erosión y se caracteriza por un patrón de escurrimiento del agua en forma de canalículos o regueros (DÍAZ, 2005).

Finalmente, la erosión de *zanjas y cárcavas*, que corresponde al último estado de expresión de erosión, es una combinación de todos los procesos y en los casos extremos existe una pérdida total de suelo (DÍAZ, 2005). Para VAN ZUIDAN (1985), citado en MÄRKER *et al.*, (2001), la erosión por zanjás y cárcavas puede clasificarse según

su profundidad; es decir, si son profundas (*deep gully*), medias profundas (*medium deep gully*) y poco profundas (*shallow gully*).

La erosión hídrica se manifiesta en una alteración de la superficie del suelo como consecuencia del movimiento de un flujo de agua superficial que transporta materiales particulado del suelo, que han sido desprendidos por el impacto de las gotas de lluvia. La erosión hídrica se vincula con una serie de factores dado que ella se constituye en un proceso natural. Entre los factores más importantes que condicionan las tasas de erosión hídrica encontramos: el régimen de lluvias, la cobertura vegetal, el tipo de suelo y la pendiente del terreno. Se debe destacar que cuando el relieve de alguna área determinada sobrepasa un valor del ángulo de pendiente, el mismo que resulta característico para cada tipo de roca o suelo, la presión que ejerce la gravedad supera la fuerza de cohesión produciéndose que los materiales se precipiten pendiente abajo, al disminuir la pendiente. La presión ejercida es menor siendo evacuados en su gran mayoría por el efecto de arrastre del agua. En esta última etapa, si los materiales elevan su cohesión superficial o se protegen de la acción del agua (cuando se desarrolla vegetación), el proceso de rebajamiento de la pendiente se frena.

## **Capítulo 2**

### **Desarrollo de la investigación**

Dentro de la presente investigación se establece como primera tarea la construcción y evaluación de unidades de respuesta a la erosión (modelo de evaluación cualitativo de los procesos de erosión) para la cuenca del río Aconcagua, siguiendo lo expuesto por MÄRKER *et al.*, (2001) en el sur de África, generando como resultado un mapa de susceptibilidad de erosión para la subcuenca testigo seleccionada dentro del valle del Aconcagua.

Para alcanzar los objetivos de la presente investigación se estableció como área testigo la subcuenca correspondiente a la comuna de Llay-Llay, lugar en el que se trabajó a una escala y resolución apropiada que permite entender los procesos erosivos que se vienen desarrollando en el resto de la superficie de la cuenca del río Aconcagua.

El presente trabajo empleó de manera básica cartografía digital y datos desplegados para ser analizados utilizando herramientas y técnicas de Sistemas de Información Geográfica, teledetección y análisis jerarquizado. Estos elementos en conjunto se interrelacionan y se complementan para lograr las respuestas a los objetivos y finalidades planteados.

Los Sistemas de Información Geográficas (SIG) según ESRI (*Environmental Systems Research Institute, 1995*) son una colección organizada de *hardware, software, datos geográficos y personal*, diseñada para capturar, almacenar, manipular, analizar y desplegar en todas sus formas la información geográficamente referenciada. Esta definición se puede completar agregando que el SIG es *“un modelo informatizado del mundo real, descrito en un sistema de referencia ligado a la tierra, establecido para satisfacer unas necesidades de información específicas respondiendo a un conjunto de preguntas concretas”* RODRÍGUEZ (1993).

HENRIQUEZ (2005) indica que los SIG, al permitir la captura, el ingreso, análisis y el desplazamiento de información proveniente de sensores remotos así como cartografía digital, facilita la proyección a futuro de los usos y coberturas de suelo. Los softwares empleados fueron el ArcGis 9.2 para el análisis espacial y el Idrisi Andes 15.0 para el análisis de imágenes satelitales.

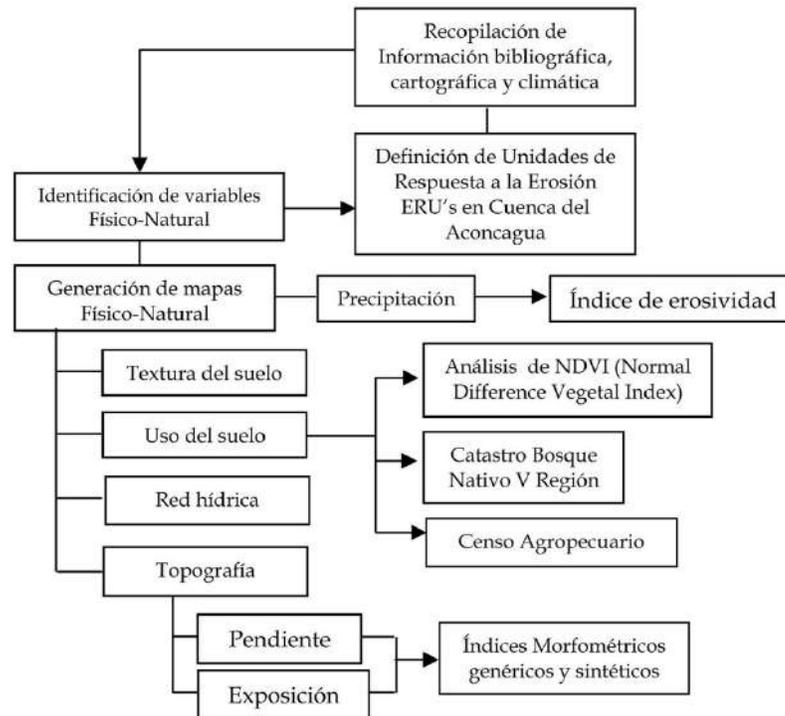
Por otra parte, la teledetección se constituye en la técnica cuyo marco de estudio está basado en la observación remota de la superficie terrestre. La teledetección no sólo engloba los procesos que permiten obtener una imagen, sino también su posterior tratamiento e interpretación (CHUVIECO, 2008). Para

alcanzar este objetivo se utilizan satélites de observación que permiten diagnosticar y evaluar el estado de los recursos territoriales. De este modo, se realizó el análisis e interpretación de procesos digitales como el Índice Normalizado de Diferencias Vegetacionales (*NDVI* en su sigla en inglés), así como la fotointerpretación de las ortofotos correspondiente al área de estudio.

Respecto al análisis jerarquizado, la finalidad fue la ponderación de las capas de información físico-natural, mediante la estimación de su importancia sobre los procesos erosivos. Este *Proceso Analítico Jerárquico* fue llevado a cabo con apoyo del software *EXPERT CHOICE*.

Con el objeto de evaluar la dinámica topográfica del área de estudio se procedió a la obtención de índices morfométricos genéricos y sintéticos aplicados para la subcuenca de la comuna de Llay-Llay. En la Fig. 15 se expone el Diagrama de la Metodología a aplicar en la presente investigación.

Figura 15. Diagrama Metodológico



### Recopilación y selección de información

Esta fase del estudio guarda relación con la selección y recopilación de información cartográfica digital y analógica, base de datos climáticos y trabajos previos desarrollados para nuestra área de estudio por entidades públicas y privadas para posteriormente representar los resultados digitales según nuestros objetivos de estudio. A continuación ponemos a consideración la información empleada de acuerdo a su tipo.

## Información Cartográfica

- **Uso de suelo.** Se empleó coberturas digitales en formato *shape* del estudio “Catastro de los Recursos Vegetacionales Nativos de Chile y sus Actualizaciones para los años 1996 y 2001” a escala 1:50.000 y 1:250.000 respectivamente desarrollados por la Corporación Nacional Forestal (CONAF). El uso del suelo está clasificado en: Áreas Desprovistas de Vegetación, Áreas urbanas e industriales, Bosques, Cuerpos de Agua, Humedales, Praderas y Matorrales, Terrenos Agrícolas y Nieves y Glaciares
- **Suelo.** Se empleó el “Estudio Agrológico V Región” desarrollada por el Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN) durante el año 1997. Esta información se desprende del análisis de ortofotos enumeradas para la cuenca de Aconcagua escala 1:20.000. La información levantada por el estudio y que fue considerada en el presente estudio es: Series de Suelo con sus variaciones, Capacidad de Uso, Clases de Drenajes, Aptitud Frutal y Agrícola. Debemos indicar que en base a las series de suelo, que se constituyen en representaciones homogéneas en sus características, se obtuvo información de orden, origen y textura.

### **Imágenes Satelitales**

- Se emplearon imágenes satelitales Landsat TM (Thematic Map), de los años 1989, 1999 y 2006, tamaño del píxel 30x30 m, con cobertura para toda la cuenca del Aconcagua para cada uno de los años las mismas que fueron corregidas ortogonalmente y radiométricamente.

### **Fotografías Aéreas**

- Fotografías aéreas en formato digital, vuelos SAF 2000, escala 1:20.000 para la subcuenca de la Comuna de Llay-Llay.

### **Unidades de Respuesta a la Erosión (ERU's)**

La determinación y descripción de las entidades susceptibles a la erosión en el valle del Aconcagua a través de la subcuenca testigo perteneciente a la comuna de Llay-Llay se basó en la metodología empleada para el análisis de los recursos hídricos y predicción de ambientes erosivos en las cuencas de los ríos Mkomazi (República de Sudáfrica) y Mbuluzi (Reino de Swazilandia) llevada a cabo por (MÄRKER, MORETTI y RODOLFI, 2001). Este trabajo se constituye en un alcance innovador para abordar los efectos causados por la dinámica del agua mediante la aplicación del

concepto de Unidades de Respuesta a la Erosión (Erosion Response Units, ERU's), delineado por MÄRKER, *et al* (1999) y FLUGEL *et al* (1999).

Las ERU's se presentan como entidades espaciales homogéneas que se originan a partir de la superposición de las formas actuales de erosión (EREFU's) y de las diversas variables del entorno físico-natural permitiendo el modelado de la erosión de acuerdo a distintos niveles de afectación.

Para reducir el declinamiento de la productividad de los suelos, la calidad del agua y para optimizar el uso de recursos para la conservación de suelos y agua, los patrones espaciales de las áreas donde la erosión se origina y las tasas de erosión asociadas deben ser identificados de forma prioritaria (HOFIERKA, 1996; LANE, 1997; MITASOVA, 1996; GAREN, 1999).

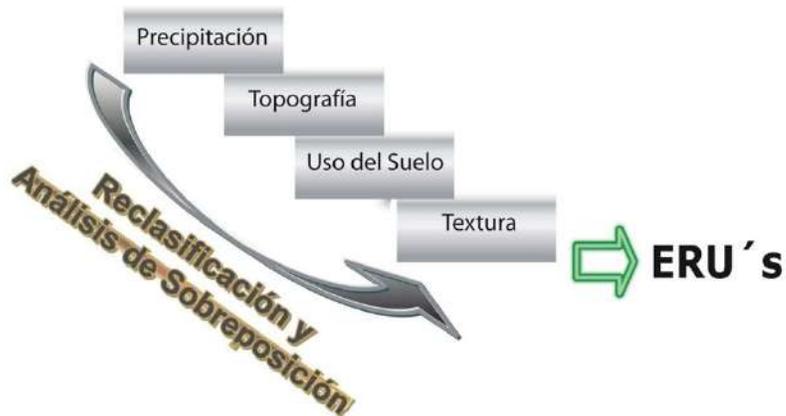
Por otra parte, la predicción de la erosión en parcelas experimentales y en pendientes de montaña o el modelamiento de la erosión de pequeñas cuencas a la misma escala de análisis, ha sido exitosa en otras latitudes de Sudamérica, para lo cual se ha usado modelos físicos que requieren una medición detallada de parámetros y considerable cantidad de datos de entrada (Jane, 1988; Zhang 1999, 2001 y 2002). Existe por lo tanto, una gran necesidad de estimar la erosión de

suelos en valles de considerables extensiones, siendo el caso de la cuenca del río Aconcagua. Debe tenerse presente sin embargo, que a esta escala existe una densidad de datos menor, y que la disponibilidad de datos con menor resolución espacial es también obvia (SAAVEDRA y MANNAERTS, 2003).

Recientes avances en tecnología de Sistemas de Información Geográfica (GIS), permiten la implementación de complejas funciones espaciales junto con una conveniente unión con datos de sensores remotos (SCHORL, 2002, SANJAY *et al.*, 2002), como los que propone la metodología de las ERU's.

La generación de las Unidades de Respuesta a la Erosión (ERU'S), para la subcuenca de la comuna de Llay-Llay implicó el establecimiento de un modelo de vulnerabilidad a la erosión con la integración de determinadas variables físico-naturales (Fig.16) las cuales luego se sometieron a un proceso de sobreposición ponderada y reclasificación mediante la aplicación de herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y Proceso Analítico Jerárquico.

Figura 16. Procedimiento de sobreposición de los parámetros utilizados para la determinación de ERU's, adaptación MÄRKER *et al.*, 2001.



Para determinar las Unidades de Respuesta a Erosión ERU's en la subcuenca de Llay-Llay, se evaluaron en forma independiente cada una de las variables físico-naturales considerando su aporte en el proceso de vulnerabilidad a erosión, para lo cual se establecieron niveles de erodabilidad y erosividad respectivamente complementados mediante un proceso analítico jerárquico. La clasificación de capas de información, su posterior superposición y reclasificación se realizó con apoyo del módulo *Spatial Analyst* de ArcMap 9.2, generando pixeles con resolución de 25 m x 25 m.

Los parámetros físico-naturales considerados en la determinación de las ERU's, para la presente investigación son: la precipitación, topografía, usos de suelos y textura.

## **Precipitación**

Varios son los factores que intervienen y condicionan la pérdida de suelo. Entre los principales se puede citar al clima, siendo la precipitación el fenómeno meteorológico más importante en el desencadenamiento de los procesos erosivos (LIENLAF, 2003).

A decir de MORGAN (1997), la erosión se relaciona con dos tipos de lluvia, la tormenta intensa de corta duración, que supera la capacidad de infiltración del suelo y la tormenta de larga duración y baja intensidad, la cual satura el suelo.

Se puede inferir que la erosión aumenta al aumentar la inclinación y la longitud de la pendiente, esto como respuesta al incremento de la velocidad y volumen de la escorrentía superficial (MORGAN 1997).

El análisis de la precipitación se realiza en base a la aplicación del Índice Modificado de Fournier IMF (Arnoldus, 1980 en Jordan y Bellifante, 2000), complementándose este análisis con el cálculo del Índice de Concentración de Precipitaciones (ICP) y el Índice de Concentración Mensual de las Precipitaciones (ICPm) de Oliver (1980).

- *Índice Modificado de Fournier (IMF)*, también llamado Índice de Agresividad Climático, está dado por la relación entre la suma del cuadrado de las precipitaciones mensuales para un año respecto de la precipitación media anual (ALIAGA Y LEYTON, 2007).

$$IMF_j = \sum_{i=1}^{12} \frac{(p_{ij})^2}{P_m}$$

Donde:

IMF<sub>j</sub>: Índice Modificado de Fournier para el año j

p<sub>ij</sub> : Precipitación mensual de mes i del año j (mm)

P<sub>m</sub>: Precipitación media anual (mm)

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 JORDAN y BELLIFANTE (2000) en RUGIERO (2006).

En la Tabla 8, se presenta la clasificación según los autores previamente mencionados.

Tabla 8. Clasificación de los valores del IMF.

<b>IMF (mm)</b>	<b>Definición</b>
< 60	Muy Bajo
60 - 90	Bajo
90 - 120	Moderado
120 - 160	Alto
> 160	Muy Alto

Fuente: CORINE – CEC (1992) en RUGIERO (2006).

La aplicación del Índice Modificado de Fournier (IMF) en lugar del el Índice de Fournier (IF), obedeció a que este último considera solamente el mes de mayor precipitación, relegando los valores del resto de los meses, no considerando por tanto, que el régimen pluvial presenta más de un pick mensual de precipitación (RUGIERO, 2006).

- **Concentración de las Precipitaciones (ICP)**, índice que permite evaluar la distribución de las lluvias a lo largo del año, definiendo la estacionalidad de las precipitaciones (Aliaga y Leyton, 2007). Los valores van desde 8, 33%, si la precipitación es igual en todos los meses del año y hasta 100% si se concentra en un solo mes. La fórmula de cálculo es la siguiente:

$$ICP_j = 100 * \sum_{i=1}^{12} \frac{P_{ij}}{P_j}$$

Donde:

$ICP_j$ : Índice de Concentración de las Precipitaciones en el año j (%)

$p_{ij}$  : Precipitación mensual del mes i en el año j (mm)

$P_j$  : Precipitación anual del año j (mm)

Cabe destacar que el cálculo del de Concentración de las Precipitaciones debe hacerse para cada año y

luego promediar según la clasificación que se expone en la Tabla 9.

Tabla 9: Clasificación del Índice de Concentración de las Precipitaciones

<b>ICP</b>	<b>Definición</b>
8.3 – 10	Uniforme
10 – 15	Estacionalidad Moderada
16 – 20	Estacional
21 – 50	Fuerte Estacionalidad
50 – 100	Aislado

Fuente: MICHIELS y GABRIELS, (1996) en ALIAGA Y LEYTON (2007)

El cálculo de los índices previamente descritos (IMF, ICP), se realizó en base a información de las estaciones pluviométricas de propiedad de la Dirección General de Aguas (DGA), que se encuentran al interior del valle del Aconcagua, Tabla 10. Es importante destacar que la selección de las mencionadas estaciones pluviométricas responde a criterios de calidad y cantidad en las series cronológicas continuas de datos existentes. Para garantizar la calidad de los resultados se propone emplear datos de precipitación mensual para un período de tiempo superior a 15 años, espacio de tiempo sugerido por Pizarro *et al.*, (2006) en ALIAGA Y LEYTON (2007).

Tabla 10: Estaciones Pluviométricas seleccionadas

<b>Nombre</b>	<b>Norte (m)</b>	<b>Este (m)</b>	<b>Altitud (msnm)</b>	<b>Período Considerado</b>	<b>N° Años Considerados</b>
Riecillos	6356403	373275	1290	1972 - 2006	35
Vilcuya	6363187	362268	1100	1972 - 2006	35
Los Andes	6365969	350240	820	1972 - 2006	35
San Felipe	6375364	338408	640	1972 - 2006	35
Catemu	6376565	318754	440	1972 - 2006	35
Estero Rabuco	6363270	301909	300	1972 - 2006	35
Lo Roja	6367232	287907	190	1972 - 2006	35
Rodelillo	6340116	258768	110	1972 - 2006	35
Los Aromos	6350896	280800	100	1974 - 2006	33
Quillota	6358041	293356	130	1978 - 2006	29
Lliu Lliu Embalse	6335543	293336	260	1978 - 2006	29
Jahuel	6382600	349988	1020	1989 - 2006	18
Alvarado Quebrada	6341122	303911	290	1990 - 2006	17
Las Chilcas	6354736	330041	850	1990 - 2006	17

Fuente: Elaboración a partir de DGA (2006) en ALIAGA y LEYTON 2007

El trabajar con datos climáticos obliga la ejecución de interpolaciones estadísticas que permitan la distribución espacial de la variable. En este sentido, se aplicará el método de interpolación de *Kriging* Universal, el cual puede describirse como un interpolador exacto que genera superficies suavizadas y aunque similar a métodos como es el caso de los polígonos de Thiessen y el método de la Inversa de la Distancia (*IDW*) cuenta con ventajas sobre ellos como el hecho de permitir la modelación de la dependencia espacial de los datos (LLOYD, 2005), facilitando conocer el tamaño del radio de búsqueda de vecinos más adecuado asumiendo

que la variación espacial de la altitud puede ser explicada, al menos parcialmente, mediante funciones de correlación espacial, se mide la varianza entre datos separados por distancias diferentes (OLIVER y WEBSTER, 1990).

Se considera que el método de *Kriging* es el mejor desde el punto de vista de la ponderación, debido a que optimiza la función de interpolación, y genera la mejor estimación lineal no sesgada del valor de una variable en un punto dado. La demostración es que el valor otorgado por la interpolación en las posiciones de los datos originales es idéntico al de éstas.

El proceso de interpolación y rasterización de los índices de precipitación para el valle del Aconcagua se realizó en base al *GIS ArcGIS 9.2*, procediendo a la reclasificación de los valores en función del grado de erosividad, mediante la extensión *Spatial Analyst* del *GIS*. Cabe destacar, que luego de que se obtuvieron los índices de precipitación necesarios para nuestro estudio dentro del valle del río Aconcagua se procedió a determinar los valores correspondientes a la subcuenca de la comuna de Llay-Llay a través de la aplicación de las técnicas de *geoprocessing* que vienen integradas en el software *ArcGIS 9.2*.

## Topografía

El análisis de la topografía se dividió entre el cálculo de las variables pendiente y exposición, las que fueron desarrolladas a partir de un Modelo de Elevación Digital (*DEM*) empleando el software *ArcGis 9.2*. Para la obtención del *DEM* se utilizaron curvas de nivel con resolución de 10 metros que cubren toda la superficie del valle del Aconcagua y que fueron facilitadas por el Centro de Información de Recursos Naturales (*CIREN*).

**Pendiente:** Elementos de la pendiente como son la gradiente (ángulo), el largo y la configuración de la pendiente, van a influir en la erosión de un área (*Soil Survey Staff, 1993*). La longitud de la pendiente tiene un efecto importante sobre el comportamiento del agua en el potencial de erosión (*Casanova y Urra, 2000*). El ángulo, es en general más importante desde el punto de vista de la gravedad de la erosión, dado que influencia directamente el transporte de sedimentos (*Baver, 1991 en Eugenin, 2004*). Un aumento del ángulo de la pendiente causa un aumento de la velocidad de escorrentía y con ello la energía cinética del agua causa una mayor erosión (*FAO, 2000*).

La clasificación de esta variable considera la relación entre umbrales morfodinámicos y el grado de la pendiente (Tabla 11).

Tabla 11. Pendiente según umbral geomorfológico

Rasgos de Pendiente (°)	Tipo de Pendiente	Umbral Geomorfológico
0 – 2	Horizontal	Erosión nula o leve
2,1 - 5	Suave	Erosión débil , difusa ( <i>Sheet wash</i> ) inicio de regueras y solifuxión fría
5,1 – 10	Moderada	Erosión moderada a fuerte, inicio de erosión lineal ( <i>rill wash</i> )
10,1 - 20	Fuerte	Erosión intensa, cárcavas incipientes
20,1 - 30	Moderadamente Escarpada	Cárcavas frecuentes , movimientos en masas, reptación
30,1 - 45	Muy Escarpada	Coluviamiento, solifuxión intensa
> 45	Acantilada	Desprendimiento, derrumbes, corredores de derrubios

Fuente: ARAYA – VERGARA & BORGEL (1972), YOUNG (1972) y FERRANDO (1993) en FERNÁNDEZ (2006)

Estos autores plantean que a partir de los 20° de pendiente, el relieve se asocia a erosión intensa, por lo cual, desde ese valor hacia los 45° y más, se determina que el rango de susceptibilidad a la erosión es muy alto (Tabla 12).

Tabla 12. Adaptación de pendiente según umbral geomorfológico

Rasgos de Pendiente (°)	Tipo de Pendiente	Grado de erodabilidad
0 – 2	Horizontal	Muy bajo
2 - 5	Suave	Bajo
5 – 10	Moderada	Moderado
10 - 20	Fuerte	Alto
20 y más	Moderadamente escarpada a Acantilada	Muy alto

Fuente: ARAYA – VERGARA & BORGEL (1972) y YOUNG (1972) en Rugiero, (2006)

**Exposición:** La exposición de las laderas es otra variable que interviene en la generación de los procesos erosivos (LIENLAF, 2003). Corresponde a la dirección de la cara de la pendiente en grados de mayor a menor, mirando hacia abajo en el sentido del escurrimiento, (RUIZ, 2005).

Las clasificaciones elementales de la exposición pueden ser:

Solana y Umbría o bien norte, sur, este u oeste, o la combinación de ambos (MOPT, 1992).

La mayoría de los suelos con exposición norte, presentan mayor grado de erosión y son delgados, existiendo muchas veces una marcada diferencia de evolución en los suelos y una distinta composición botánica de la flora del lugar. La ladera norte, tiene una mayor exposición al sol y se seca más rápido que la parte baja y las otras

laderas. Consecuencialmente estos suelos tienen un nivel más bajo de materia orgánica, debido a una mayor mineralización y, cuando se secan, son más frágiles que los de ladera sur, frente a la lluvia y el escurrimiento. En el invierno, la acción de congelación y descongelación es más intensa que en la ladera sur. De otro lado, la evaporación es mayor en la ladera norte (PERALTA, 1993).

La exposición de las pendientes tiene una relación estrechísima también con la cantidad de agua de precipitación, sobre todo entre las exposiciones Oriente y Poniente de la Cordillera de la Costa, en todos aquellos sectores en donde el eje longitudinal de las montañas está en ángulo recto con los vientos predominantes.

En lo relacionado con la exposición de solana, una ladera recibe la mayor exposición a la insolación, lluvias y vientos predominantes. En cuanto a la exposición de umbría, una ladera recibe la menor exposición a la insolación, lluvias y vientos predominantes (RUIZ, 2005). En este sentido, las laderas de solana presentan suelos más delgados y erosionados, causados por una intensa radiación solar que se mantiene por largas horas durante el día, aumentando la evaporación, y consecuentemente la deshidratación, disgregación y disminución de la materia orgánica en el suelo, situación

que acelera los procesos de erosión (ALIAGA Y LEYTON, 2007) mientras que las laderas de umbría, por otra parte, presentan menor vulnerabilidad en comparación con las de solana. En éstas, la humedad es mayor, lo cual posibilita el desarrollo de la vegetación y en consecuencia mejoran las condiciones del suelo, presentando de esta forma un menor potencial erosivo. Sin embargo, el mayor grado de humedad existente, aumenta el riesgo potencial de procesos de deslizamientos y remociones de terreno (LIENLAF, 2003).

Parte importante de la fisiografía de Chile corresponde a lomajes, cerros y montañas. Esta característica define la influencia climática dado que las principales lluvias, vientos e insolación que provienen del sur-oeste afectan en mayor proporción la exposición Norte, la cual históricamente ha sido la más cultivada y/o utilizada exhibiendo actualmente la mayor degradación (RUIZ, 2005).

La clasificación de la orientación del relieve se hizo en cuatro categorías basados en su relevancia frente a procesos erosivos, (Tabla 13).

Tabla 13. Clasificación exposición de laderas según susceptibilidad erosiva

<b>Exposición de Laderas</b>	<b>Susceptibilidad Erosiva</b>
Norte Plano (0° - 22,5° / 33,7°- 360 °)	Muy Alta
NE - NO (22,5° - 67,5° / 292,5° - 337,5°)	Alta
E - O (67,5° - 112,5°/247,5° - 292,5°)	Moderada
SE - S - SO (112,5° - 247,5°)	Baja

Fuente: SAG (2005)

### **Cobertura del Suelo y Densidad Vegetal**

Para fines de este estudio, la clasificación de los usos de suelo en relación con los procesos erosivos, interesa solo según el grado de protección que estos usos le ofrezcan al suelo de acuerdo a la cobertura que los caracterice (ALIAGA y LEYTON, 2007). Las diferentes coberturas vegetacionales se clasifican según los principios de erosionabilidad, relacionando el grado de recubrimiento vegetal de los usos existentes en el área de estudio y según la intensidad de los procesos erosivos adaptados a RAYMOND y HAMMER (1992) y LÓPEZ (1994).

Empleando coberturas digitales en formato *shape* a escala 1: 50.000 para los años 1996 y 2001, generadas por la Comisión Nacional Forestal (CONAF) y la Comisión Nacional de Medio Ambiente (CONAMA) y el estudio de

Fragilidad de Laderas llevado a cabo por el Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN) en el año 2007, el autor de la presente investigación realizó la clasificación del uso del suelo de acuerdo al grado de erosionabilidad con el apoyo del módulo *Spatial Analyst* de ArcGis 9.2. Esto se puede apreciar en la Tabla 14.

Tabla 14. Clasificación Usos suelos según grados de erosionabilidad

<b>Usos de Suelo</b>	<b>Grado de Erosionabilidad</b>
Matorral Arborescente Denso, Renoval Denso, Vegas	Bajo
Matorral arborescente Semidenso, Matorral (Semidenso y Denso), Plantación, Renoval Semidenso.	Medio
Terrenos Agrícolas, Matorral Arborescente ( muy abierto, abierto), Matorral Suculentas Abierto, Matorral Abierto	Alto
Matorral Muy Abierto, Praderas Anuales, Otros terrenos sin vegetación, Paltos	Muy alto

Fuente: Elaboración propia

La aproximación inicial para la determinación de la densidad vegetacional se realizó a partir de valores del Índice Normalizado de Diferencias Vegetales (*Normal Difference Vegetal Index, 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 fue obtenido de las bandas 03 y 04 de la imagen satelital LANDSAT 7 ETM (Tamaño píxeles de 30 x 30 metros), correspondiente a los años 1975, 1989, 1999 y 2006 empleando el software IDRISI ANDES y ArcGis 9.2. A decir de 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). Posteriormente se reclasificaron los valores en base a lo establecido por MÄRKER *et al.* (2001), (Tabla 15).

Tabla 15: Rangos de cobertura vegetal para el área de estudio

Rango	Densidad Vegetal %	Intensidad Vegetal	Valores NDVI Reclasificados
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: MÄRKER *et al.*, (2001)

## Textura

Para efecto del presente estudio se establecieron diferentes clases texturales a partir del Estudio Agrológico para la V Región de Valparaíso desarrollado por CIREN-CORFO (1997). De esta manera empleando los datos de las series de suelos incluidas en el citado estudio se procedió a clasificar la textura del suelo según su grado de erosionabilidad, de acuerdo a lo establecido por Almorox (1994), Morgan (1997) y Ortiz (1984), (Tabla 16).

Tabla 16. Clasificación de texturas según grado de erosionabilidad

<b>Texturas y Formación Superficial</b>	<b>Grado Erosionabilidad</b>
Arcillo Limosa (AL), Arcillosa (A), Misceláneo Aluviales (MA)	Muy Baja
Franco Arcillosa (FA) ,Franca Arcillo Arenosa (FAa), Franca Arcillo Limosa (FAL), Misceláneo Coluviales (MC)	Baja
Franca Limosa (FL), Franca (F), Misceláneo Quebrada (MQ),	Moderada
Franca Arenosa ( Fa), Franca Arenosa muy fina , (Faf)Franca Arenosa muy fina (Famf)	Alta
Areno Francosa (aF),	Muy Alta

Fuente: Almorox (1994), Morgan (1997), IDEAM (2000), Ortiz (1984) en ALIAGA Y LEYTON (2007)

## Índices Morfométricos

Con el estudio de los índices morfométricos se busca evaluar y analizar espacialmente la dinámica topográfica que se desarrolla en el valle del Aconcagua. El estudio se basa en la importante necesidad de determinar la ubicación actual y potencial de este tipo de fenómenos, permitiendo de este modo, identificar áreas con una mayor vulnerabilidad para generar movimientos del terreno en masa, erosión de tipo lineal o problemas de inundación, los que de manera recurrente representan un riesgo para el hombre, (FERNÁNDEZ *et al.*, 2007). Cabe destacar que la descripción del relieve a través de un conjunto de índices, recibe el nombre de parametrización, que es la descripción cuantitativa de la superficie para distinguir topografías diferentes (PIKE, 1993).

BÖRGEL (2004), manifiesta que existe una estrecha relación entre la estructura del relieve y la red hídrica, existiendo patrones cercanos entre sí, razón por la cual la evolución de los sistemas de drenaje es un indicador del relieve que señala la presencia de capturas fluviales o cambios en la dirección del sistema de drenaje. Según lo expuesto por MÄRKER *et al.*, (2001), los procesos erosivos están influenciados por la cuenca de drenaje.

Sin embargo, su distribución no es aleatoria, sino también responde a la compleja interacción de diferentes factores abióticos y bióticos (GONZÁLEZ *et al.*, 1995).

La metodología utilizada consistió en el modelamiento del relieve partir de la elaboración de un modelo digital de elevación (*digital elevation model, DEM*) y de la red hídrica digital. La elaboración del *DEM* requirió del análisis espacial de las curvas de nivel con una distancia de 10 metros. Posteriormente, mediante un análisis espacial SIG del modelo digital de elevación y la red hídrica, se determinaron cuatro parámetros de tipo morfométricos, siendo estos la pendiente y la exposición a la precipitación que se constituyeron en índices genéricos y que se emplearon como *input* para la determinación de los parámetros de tipo sintético, los cuales corresponden al índice de estabilidad de laderas (*Stability Index, SI*) e índice de capacidad de transporte de los materiales (*Transport Capacity Index, TCI*), (FERNÁNDEZ *et al.*, 2007).

Los índices sintéticos (*SI* y *TCI*), que poseen una baja capacidad de transporte de materiales, están asociados a relieves estables, básicamente asociados a sectores con pendiente plana, mientras que las áreas con capacidad de transporte media y alta poseen

superficies inestables en torno a los ambientes de montaña.

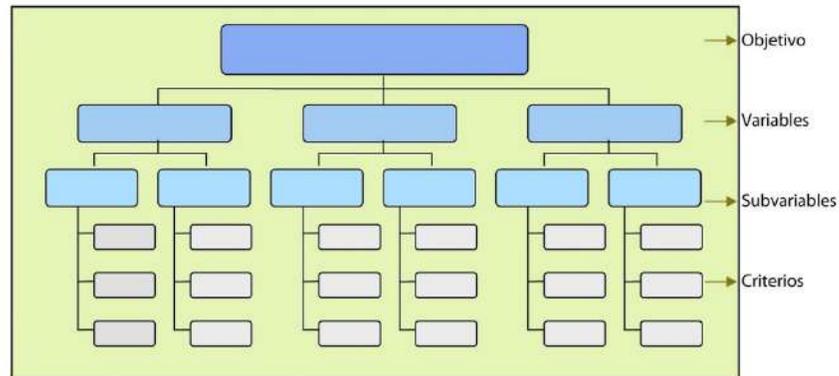
### **Proceso Analítico Jerárquico**

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 – natural a través de la estimación de sus importancias individualizadas sobre el proceso de vulnerabilidad erosiva (FERNÁNDEZ, 2006).

El Proceso Analítico Jerárquico (*Analytical Hierarchy Process, AHP*), se constituye en un procedimiento sistemático que se emplea para representar jerárquicamente un problema, permitiendo su división en sus componentes más pequeñas, SAATY *et al.* (1991). El Proceso Analítico Jerárquico se presenta como una forma racional, eficiente y gráfica de ordenar sistemas (FERNÁNDEZ, 2006), definiendo con claridad el objetivo

que se busca así como las variables y los criterios de decisión que se encuentran implícitos. (Fig.17).

Figura 17: Estructura jerárquica utilizada por el AHP



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

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 uno 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 (Tabla 17).

Tabla 17: 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 *et al.* (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 *et al.* (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 (Tabla 18).

Tabla 18: 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)

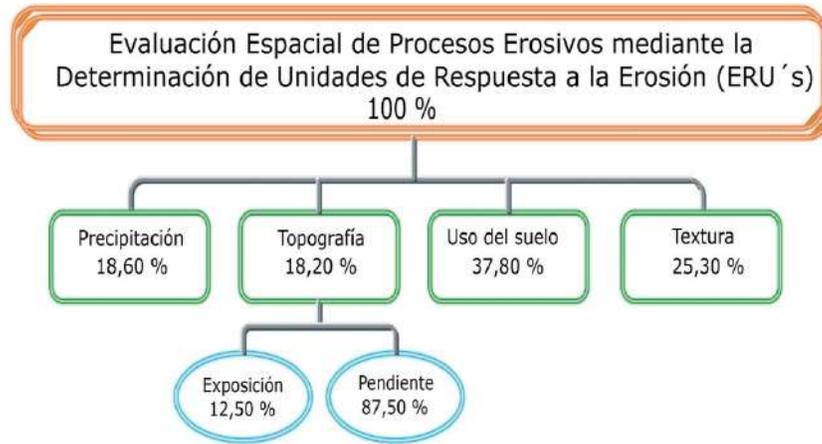
El proceso Analítico Jerárquico aplicado para la determinación de la vulnerabilidad a la erosión en la subcuenca de la comuna de Llay-Llay se elaboró en base a consulta realizada a expertos relacionados con

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.

### **Proceso Analítico Jerárquico**

La determinación de las Unidades de Respuesta de la Erosión (ERU's) conllevó el establecimiento y desarrollo de un Modelo Analítico Jerárquico que definiera los pesos individuales de las variables que componen el Modelo de Vulnerabilidad en relación con el proceso global de susceptibilidad a la erosión en la subcuenca de la comuna de Llay-Llay (Fig. 18).

Figura 18: Estructura Analítica Jerárquica



Fuente: Elaboración propia en base a consulta de expertos de CIREN y CONAF

Cabe destacar que el valor de inconsistencia determinado por el software *EXPERT CHOICE* fue de 0,09, lo cual indica que la estructura jerárquica y los pesos de las variables físicos-naturales, reúnen una lógica aceptable en relación al objetivo central que es la Determinación de las ERU´s para la subcuenca de la comuna de Llay-Llay. Todo esto enmarcado de acuerdo a lo indicado por SAATY *et al.* (1991), él mismo que manifiesta que de presentarse una inconsistencia superior al 0,1 el modelo sería considerado inconsistente (Tabla 19).

Tabla 19: Pesos de las Variables y Categorías según importancia

Variable	Categoría	Peso Variable	Peso Total Variable	
Precipitación (Agresividad pluvial)		0.186		
	Muy bajo	0.006	0.00118	
	Bajo	0.010	0.00180	
	Moderado	0.024	0.00446	
	Alto	0.057	0.01066	
	Muy alto	0.089	0.01647	
Topografía		0.182		
	Exposición		0.023	
		Bajo	0.001	0.00003
		Medio bajo	0.014	0.00032
		Medio	0.000	0.00000
		Medio alto	0.000	0.00001
	Pendiente	Alto	0.006	0.00014
			0.159	
		Muy bajo	0.005	0.00076
		Bajo	0.009	0.00142
		Moderado	0.016	0.00250
		Alto	0.039	0.00617
	Muy alto	0.091	0.01441	
	Uso del Suelo		0.378	
Bajo		0.013	0.00486	
Medio		0.031	0.01186	
Alto		0.100	0.03772	
Muy alto		0.234	0.08830	
Textura		0.253		
	Muy baja	0.011	0.00269	
	Baja	0.016	0.00416	
	Moderada	0.029	0.00736	
	Alta	0.057	0.01434	
	Muy alta	0.140	0.03546	
Valor Inconsistencia	0.09			

Fuente: Elaboración propia en base a consulta de expertos de CIREN y CONAF

### **Cobertura del Suelo del valle del Aconcagua.**

De esta manera se presentan los NDVI para los años 1975, 1989,1999, 2006 en el valle del Aconcagua en donde se puede apreciar el aumento de la vigorosidad vegetal especialmente de entre la época de los ´70 hasta pasada la época de los ´90., (Fig. 19, 20, 21 y 22).

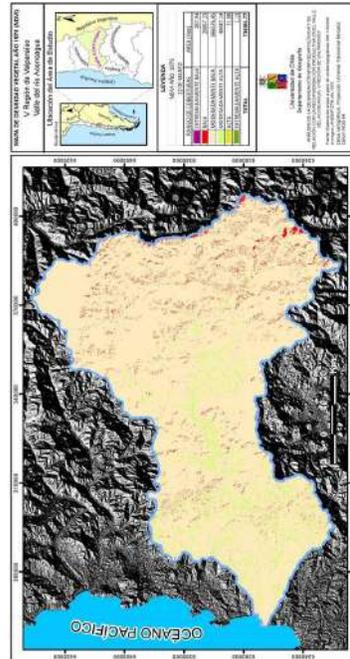
Al analizar los resultados del NDVI para el año 1975 se puede notar que la clase moderadamente baja ocupa un 90% de la superficie del valle del Aconcagua mientras que un 6% del área del valle corresponde a la clase moderadamente alta, (Tabla 20).

Tabla 20: Densidad Vegetal año 1975

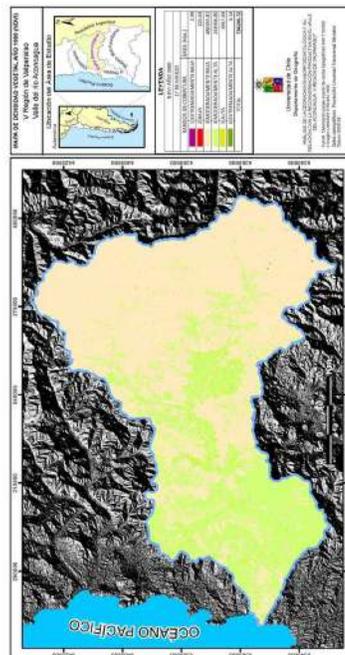
	RANGOS DE COBERTURA	Densidad Vegetal	Km <sup>2</sup>	%
1	EXTREMADAMENTE BAJA	< 10%	2,879	0,04
2	BAJA	10% - 25%	208,572	2,84
3	MODERADAMENTE BAJA	26% - 50%	6665,765	90,77
4	MODERADAMENTE ALTA	51% - 75%	466,471	6,35
5	ALTA	76% - 90%	0,119	0
6	EXTREMADAMENTE ALTA	> 90%	0,011	0
TOTAL			<b>7343,82</b>	<b>100</b>

Fuente: Elaboración propia

Figura 19. NDVI, año 1975



Fuente: Elaboración propia a partir de Imágenes LANDSAT ETM  
Figura 20. NDVI, año 1989



Fuente: Elaboración propia a partir de Imágenes LANDSAT ETM

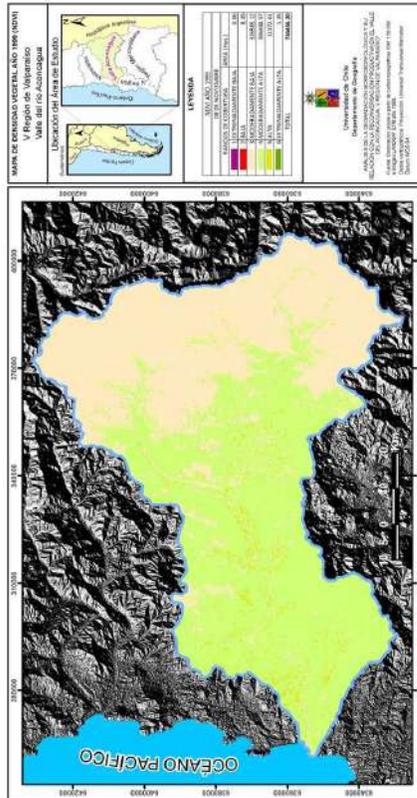
Para el año 1989 la densidad vegetal determinada por medio del NDVI muestra que el 66% de la superficie de nuestra área de estudio presenta una cobertura moderadamente baja, mientras que la clase de cobertura moderadamente alta se encuentra presente en un 33% de la superficie del valle, (Fig. 22), por lo tanto, con respecto al año 1975 se puede señalar que la clase moderadamente baja de un 90% disminuye a un 66% de la superficie de la cuenca del valle del Aconcagua mientras que la clase moderadamente alta aumenta de un 6% a un 33%, (Tabla 21).

Tabla 21: Densidad Vegetal año 1989

	RANGOS DE COBERTURA	Densidad Vegetal	Km <sup>2</sup>	%
1	EXTREMADAMENTE BAJA	< 10%	0,03	0
2	BAJA	10% - 25%	1,23	0,02
3	MODERADAMENTE BAJA	26% - 50%	4863,56	66,24
4	MODERADAMENTE ALTA	51% - 75%	2439,47	33,22
5	ALTA	76% - 90%	38,18	0,52
6	EXTREMADAMENTE ALTA	> 90%	0	0
TOTAL			<b>7342,47</b>	<b>100</b>

Fuente: Elaboración propia

Figura 21. NDVI, año 1999



Fuente: Elaboración propia a partir de Imágenes LANDSAT ETM Para la década de los ´90 la densidad de la cobertura vegetal en el valle del Aconcagua presenta un comportamiento homogéneo entre la clase moderadamente baja y moderadamente alta, con porcentajes de cobertura en la superficie del valle de un 46% y 49%, respectivamente (Tabla 22). Al comparar la distribución de la densidad vegetal del año 1989 frente a la del año 1999 observamos que en la década de los ´90 la clase moderadamente baja descendió de un 66% a un 46% de la superficie del valle del Aconcagua mientras que la clase moderadamente alta aumento de

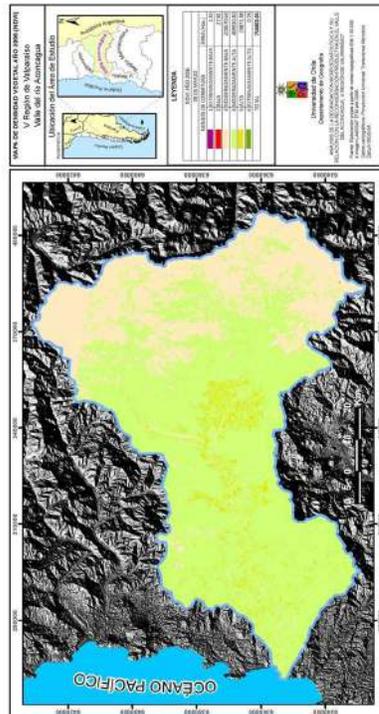
un 33% a un 49% en cuanto a la superficie ocupada en el valle del río Aconcagua.

Tabla 22: Densidad Vegetal año 1999

RANGOS DE COBERTURA		Densidad Vegetal	Km <sup>2</sup>	%
1	EXTREMADAMENTE BAJA	< 10%	0,001	0
2	BAJA	10% - 25%	0,105	0
3	MODERADAMENTE BAJA	26% - 50%	3414,273	46,49
4	MODERADAMENTE ALTA	51% - 75%	3600,746	49,03
5	ALTA	76% - 90%	329,443	4,49
6	EXTREMADAMENTE ALTA	> 90%	0,018	0
TOTAL			<b>7344,58</b>	<b>100</b>

Fuente: Elaboración propia

Figura 22. NDVI, año 2006



Fuente: Elaboración propia a partir de Imágenes LANDSAT ETM

En relación al año 2006 la densidad vegetal en el valle del Aconcagua se presenta con una distribución de un 66% de la clase moderadamente alta frente a la clase moderadamente baja que se distribuye en un 30% de la cuenca del río Aconcagua, (Tabla 23). Comparando con lo sucedido en el año 1999 podemos notar un aumento en la superficie del valle correspondiente a la clase moderadamente alta, la misma que subió de un 49% a un 66% mientras que la densidad vegetal moderadamente baja descendió de un 46% en el año 1999 a un 30% en el año 2006.

Tabla 23: Densidad Vegetal año 2006

RANGOS DE COBERTURA		Densidad Vegetal	Km <sup>2</sup>	%
1	EXTREMADAMENTE BAJA	< 10%	0,01	0
2	BAJA	10% - 25%	0,28	0
3	MODERADAMENTE BAJA	26% - 50%	2205,71	30,03
4	MODERADAMENTE ALTA	51% - 75%	4899,3	66,71
5	ALTA	76% - 90%	238,71	3,25
6	EXTREMADAMENTE ALTA	> 90%	0,01	0
TOTAL			<b>7344,02</b>	<b>100</b>

Fuente: Elaboración propia

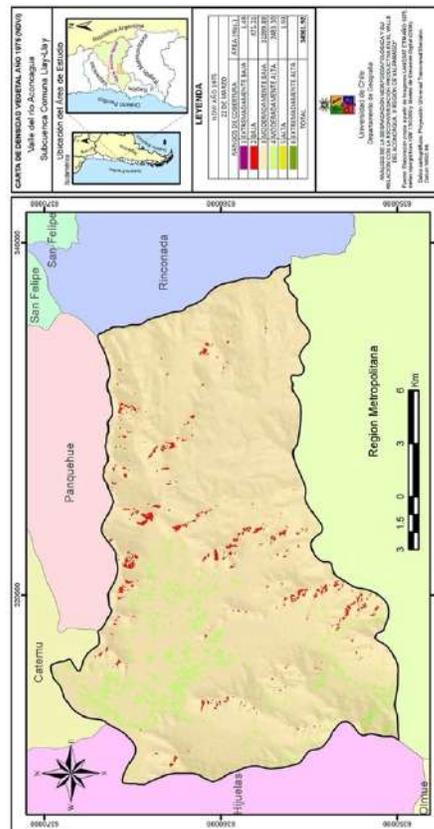
### **Cobertura del Suelo de la comuna de Llay-Llay**

Para conocer la cobertura del suelo de Llay-Llay en la década de los '70 y '80, se determinó el Índice Normalizado de las Diferencias Vegetacionales (NDVI) a partir del análisis de imágenes Landsat ETM.

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 vegetal 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 23 y Tabla 24).

Figura 23: NDVI año 1975, Llay-Llay



Fuente: Elaboración propia en base a Imagen Landsat ETM

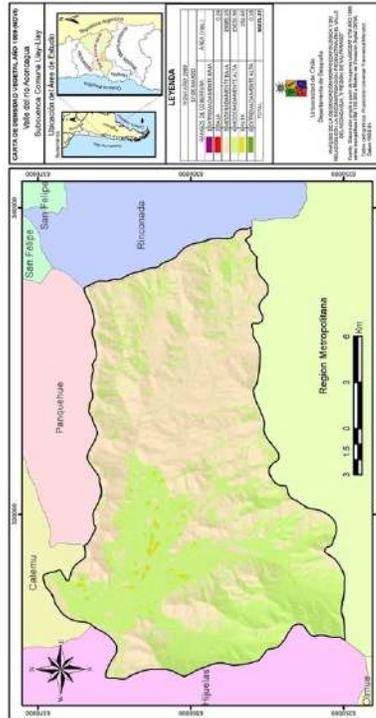
Tabla 24. Densidad Vegetal (NDVI), año 1975

NDVI AÑO 1975				
22 DE MARZO				
	RANGOS DE COBERTURA	Densidad Vegetal	ÁREA (Has.)	%
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			<b>34961.92</b>	<b>100.00</b>

Fuente: Elaboración propia en base a Imagen LANDSAT ETM

En el año 1989 el NDVI calculado para la subcuenca de Llay-Llay muestra una variación en relación a la densidad vegetal del año de 1975. Se puede apreciar un 54% de cobertura moderadamente baja frente a un 44% de superficie con una densidad vegetal moderadamente alta, distribuida en el fondo de valle así como en ciertos sectores de piedmont de los cerros circundantes, (Fig. 24 y Tabla 25).

Figura 24: NDVI año 1989, Llay-Llay



Fuente: Elaboración propia en base a Imagen Landsat ETM

Tabla 25. Densidad Vegetal (NDVI), año 1989

NDVI AÑO 1989				
17 DE MARZO				
	RANGOS DE COBERTURA	Densidad Vegetal	ÁREA (Has.)	%
1	EXTREMADAMENTE BAJA	< 10%		
2	BAJA	10% - 25%	0.24	0.001
3	MODERADAMENTE BAJA	26% - 50%	19085.19	54.574
4	MODERADAMENTE ALTA	51% - 75%	15632.99	44.702
5	ALTA	76% - 90%	252.67	0.723
6	EXTREMADAMENTE ALTA	> 90%	0.18	0.001
TOTAL			<b>34971.27</b>	100.00

Fuente: Elaboración propia en base a Imagen LANDSAT ETM

El Instituto Nacional de Investigaciones de Recursos Naturales (IREN –CORFO) en el año de 1979 en su estudio de Fragilidad de los Ecosistemas naturales de Chile, establece que la comuna de Llay-Llay presenta niveles de erosión graves en donde se incluyen aquellas áreas que revelan alta densidad continua de rangos erosivos lineales y areales en toda su superficie, excepto en el fondo de valle, espacio que no se considera con problemas de erosión.

La Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA) en su Censo Agropecuario del año 1997, establece el uso del suelo para la comuna de Llay-Llay en 8 clases, siendo las áreas de praderas naturales la clase que ocupa el 80% de la superficie comunal. Los cultivos anuales y permanentes ocupan el 8% de la superficie de la subcuenca, mientras que apenas un 0,50% del área comunal es ocupada por plantaciones forestales, bosques y montes, (Tabla 26).

Tabla 26. Uso del Suelo, año 1997

<b>Uso del Suelo</b>	<b>Superficie (Ha)</b>	<b>%</b>
Cultivos Anuales y Permanentes	3,007.10	8.66
Praderas Sembradas	669.10	1.93
Praderas Mejoradas	496.60	1.43
Praderas Naturales	27,861.10	80.27
Barbecho y Descanso	633.70	1.83
Plantaciones Forestales: Bosques y Montes	175.20	0.50
Infraestructura	432.40	1.25
Terrenos Estériles y Otros no Aprovechados	1,432.30	4.13
<b>Superficie total</b>	<b>34,707.50</b>	<b>100.00</b>

Fuente: Elaboración propia en base a ODEPA, 1997

El Estudio Agrológico para la V Región de Valparaíso desarrollado por el Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN) en el año de 1997, dentro de sus diversas variables, describe la erosión existente en la comuna, ubicando al 50% de su superficie en la clase "sin erosión", cuya área corresponde a sectores de menor pendiente, mientras que un 11% de la superficie muestra erosión moderada. Los niveles de erosión presentados en el Estudio Agrológico se presentan subestimados al determinar la inexistencia de erosión así como por el hecho de dejar sin clasificar un 30% de la superficie comunal, (Fig. 25 y Tabla 27).



El Censo Agropecuario llevado a cabo por la Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA) en el año 2007, determina para la comuna de Llay-Llay nueve clases de usos del suelo, siendo la cobertura de matorrales la clase que se impone ocupando un 44% del área comunal. Seguidamente se presenta un 12% de la superficie de la subcuenca cubierta por cultivos anuales y perennes. Cabe destacar la presencia de un 37% de la superficie comunal por terrenos estériles y no aprovechados, (Tabla 28).

Tabla 28. Uso del Suelo, año 2007

<b>Uso del Suelo</b>	<b>Superficie (Ha)</b>	<b>%</b>
Cultivos Anuales y Permanentes	3,918.37	12.44
Forrajeras Permanentes	477.80	1.52
Praderas Mejoradas	194.50	0.62
Praderas Naturales	128.10	0.41
Barbecho y Descanso	312.80	0.99
Plantaciones Forestales: Bosques y Montes	226.00	0.72
Matorrales	13,945.00	44.29
Infraestructura	417.43	1.33
Terrenos Estériles y Otros no Aprovechados	11,865.50	37.69
<b>Superficie total</b>	<b>31,485.50</b>	<b>100.00</b>

Fuente: Elaboración propia en base a ODEPA, (2007)

Del proyecto Determinación de Erosión Actual y Fragilidad de Suelos en la V Región, utilizando datos satelitales y SIG del año 2009 desarrollado por el Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN) se

estableció niveles de erosión existentes en un área de 13.557,1 ha del secano interior de la subcuenca de Llay-Llay, (Tabla 29).

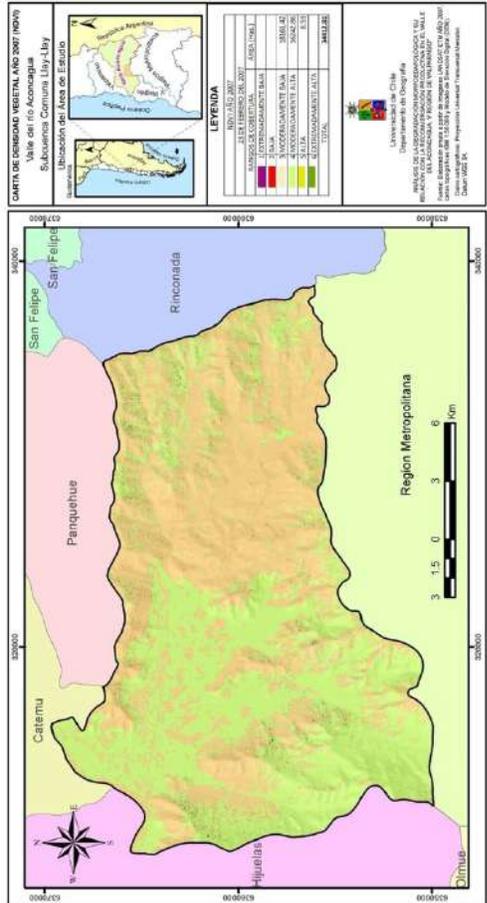
Tabla 29. Erosión actual, año 2009

<b>Intensidad de la Erosión</b>	<b>Hectáreas</b>	<b>%</b>
Sin erosión	215,6	1,6
Moderada	3.822,3	28,0
Severa	6.213,3	45,5
Muy severa	3.406,3	24,9
<b>Total</b>	<b>13.657,6</b>	<b>100,00</b>

Fuente: Elaboración propia en base a CIREN, 2009

El análisis del Índice Normalizado de las Diferencias Vegetacionales (NDVI) en la comuna de Llay-Llay para el año 2007, indica que la superficie de la subcuenca se reparte entre la cobertura moderadamente baja con un 52% de la superficie y la cobertura moderadamente alta con un 47% del total del área que constituye la comuna de Llay-Llay, (Figura 26 y Tabla 30).

Figura 26: NDVI año 2007, Llay-Llay



Fuente: Elaboración propia en base a Imagen Landsat ETM  
Tabla 30. Densidad Vegetal (NDVI), año 2007

NDVI AÑO 2007				
23 DE FEBRERO DEL 2007				
RANGOS DE COBERTURA	Densidad Vegetal	ÁREA (Has.)	%	
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			<b>34412.81</b>	<b>100.00</b>

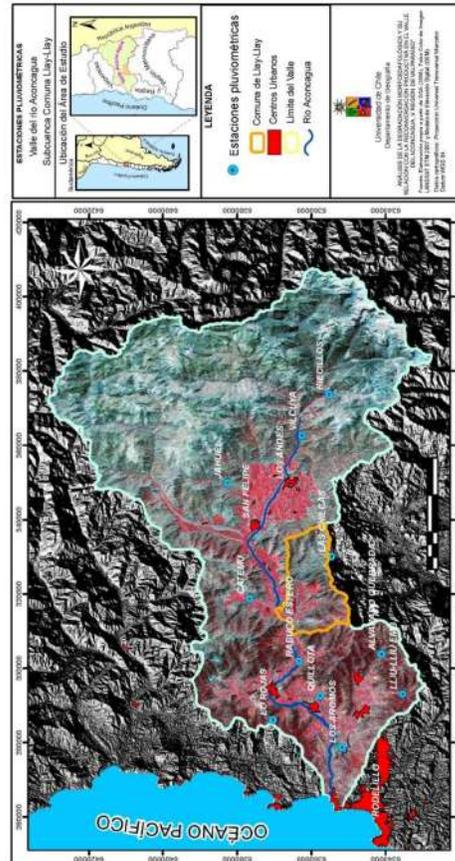
Fuente: Elaboración propia en base a Imagen  
LANDSAT ETM

Basado en el análisis del censo agrícola del año 2007 es importante destacar la presencia de una considerable área clasificada como terrenos estériles, al igual que una importante superficie compuesta por matorrales en donde no se han establecido los niveles de erosión potencial. Por otra parte, el estudio de erosión actual en un 40% de la subcuenca de la Comuna de Llay-Llay del año 2009, muestra que la comuna presenta un alto índice erosivo en el 39% de la comuna, correspondiendo un 45% a la clase erosiva severa, mientras que un 24% presenta una erosión muy severa.

#### **Vulnerabilidad a la erosión mediante Unidades de Respuesta a la Erosión (ERU's) para la comuna de Llay-Llay. Precipitación**

El establecimiento de los índices pluviométricos para la comuna de Llay-Llay se lo realizó en base al análisis de las series de datos de precipitación mensual de catorce estaciones presentes en el valle del Aconcagua con el ánimo de lograr óptimos resultados de interpolación, a pesar que solo son tres las estaciones pluviométricas que se ubican en el área de influencia directa de la comuna de Llay-Llay, siendo estas, las estaciones de Catemu, Las Chilcas y estero Rabuco (Fig. 27).

Figura 27. Estaciones pluviométricas



Fuente: Elaboración en base a DGA, 2006

Los índices pluviométricos, resultantes del procesamiento matemático de las series temporales de la precipitación mensual de las catorce estaciones pluviométricas que se ubican el valle del río Aconcagua (Tabla 31 y anexo 1) sumado al proceso de interpolación respectivo, permite apreciar que la precipitación media anual de la subcuenca de la comuna Llay-Llay se ubica en el rango de los 250 mm a 390 mm, siendo la distribución de las mismas en sentido

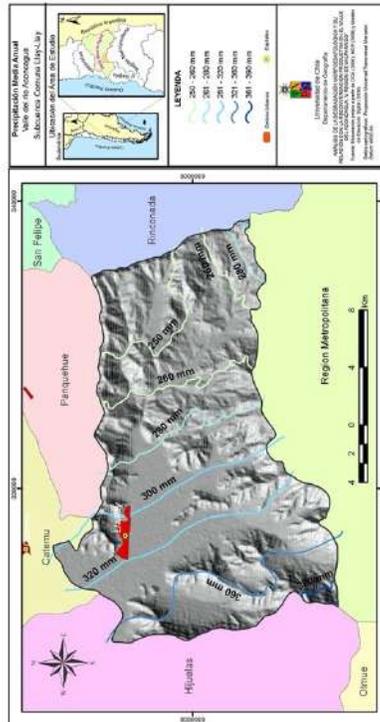
este a oeste alcanzando su valor intermedio en el fondo de valle de la comuna, (Fig. 28).

Tabla 31. Resumen de de precipitación e índices de erosividad pluvial según estaciones meteorológicas presentes en el valle del Aconcagua (1972-2006)

Nombre Estación	Precipitación (mm)		Índices de Erosividad Pluvial (%)		
	Media Mensual	Media Anual	IMF	IF	ICP
RIECILLOS	235,6	540,3	200,9	141,1	28,56
VILCUYA	154,7	377,9	130,5	88,3	26,9
LOS ANDES	117	264,6	102,2	70,8	31,39
SAN FELIPE	106,4	224	104,2	77,4	32,08
<b>CATEMU</b>	<b>121,4</b>	<b>257,5</b>	<b>109,7</b>	<b>80,5</b>	<b>33,05</b>
<b>ESTERO RABUCO</b>	<b>189,7</b>	<b>410,9</b>	<b>166,3</b>	<b>118,7</b>	<b>34,3</b>
LO ROJA	207,2	429	184,5	137,6	33,06
RODELILLO	220,3	509,4	182,7	123,2	30,09
LOS AROMOS	190,2	423,3	165,6	114,9	31,48
QUILLOTA	160,3	362,9	141,1	99,1	30,46
LLIU LLIU EMBALSE	258,6	573,6	230,5	169,8	29,47
JAHUEL	103,8	252	96,7	63,2	30,93
ALVARADO	203,8	476,1	184,2	126,6	31,1
<b>LAS CHILCAS</b>	<b>115,3</b>	<b>253,5</b>	<b>103</b>	<b>72,6</b>	<b>32,09</b>

Fuente: Elaboración a partir de datos de precipitación mensual DGA (2006) del período comprendido entre 1972-2006,

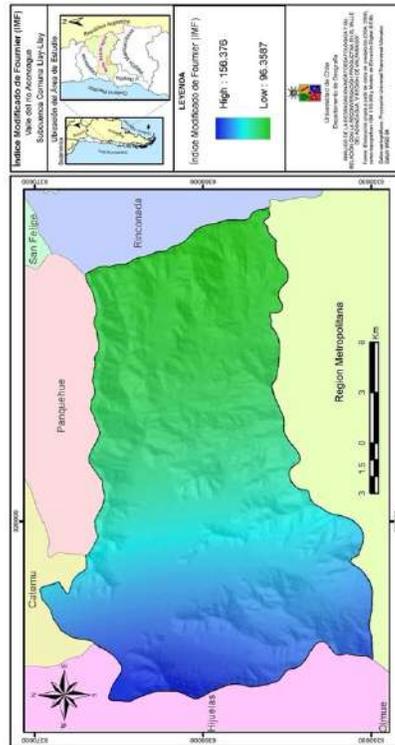
Figura 28. Precipitación Media Anual



Fuente: Elaboración propia en base a DGA, 2006

El análisis de la erosividad de la precipitación se calculó mediante el establecimiento del Índice Modificado de Fournier (IMF). De esta manera el cálculo del IMF para la subcuenca de la comuna Llay-Llay muestra una distribución del IMF de acuerdo a un rango de entre los 96 y 156%, (Fig. 29).

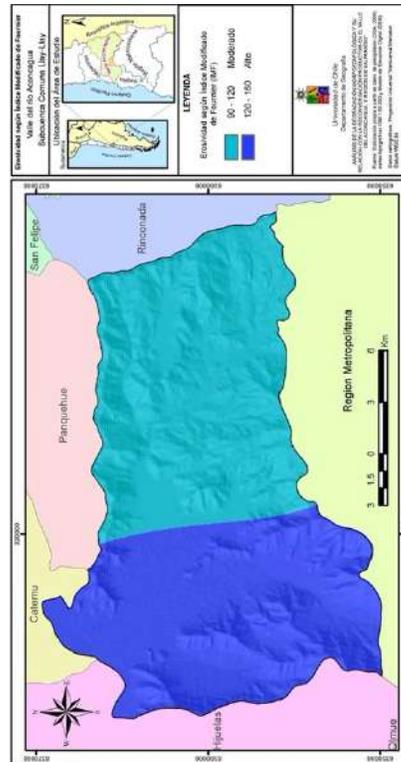
Figura 29. Índice Modificado de Fournier (IMF)



Fuente: Elaboración propia en base a DGA, 2006

La vulnerabilidad a la erosión en la subcuenca de Llay-Llay a través del IMF reclasificado, de acuerdo al CEC (1992), determinó la existencia de niveles de erosividad moderado y alto, (Fig. 30).

Figura 30. Erosividad según Índice Modificado Fournier



Fuente: Elaboración propia en base a DGA, 2006

La erosividad moderada según el IMF se distribuye en un 51% de la superficie de la comuna de Llay-Llay correspondiendo a la parte centro este de la subcuenca mientras que el 47% de la superficie de la zona de estudio presenta una erosividad alta, la misma que se extiende al sector centro oeste de la comuna, (Tabla 32).

Tabla 32. Distribución de índice Modificado de Fournier

Subcuenca	Superficie Total Km <sup>2</sup>	Superficie %	
		Moderado	Alto
Llay-Llay	349.99	51.99	47.97

Fuente: Elaboración propia en base a DGA, 2006

### **Erosionabilidad según topografía del terreno**

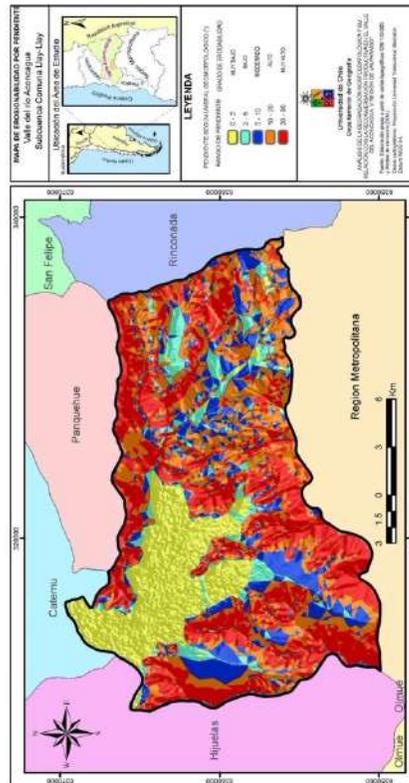
La comuna de Llay-Llay presenta una distribución de la altitud que va desde los 300 msnm hasta los 2010 msnm. El cálculo de la erosionabilidad del suelo de la subcuenca de la comuna de Llay-Llay de acuerdo a la topografía del terreno se encuentra dado por el análisis de los factores que la componen, siendo estos la pendiente y la exposición. Seguidamente se abordan el análisis de los dos factores que se derivan de la topografía del área de estudio.

#### **Pendiente**

En base al análisis del Modelo Digital de Elevación (DEM) construido a partir de las curvas de nivel con resolución de 10 metros para el valle del Aconcagua, proporcionada por el Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN) se calculó la distribución de la pendiente (grados) en la subcuenca de la comuna de Llay-Llay, la misma que presenta valores que llegan hasta los 67 grados. En la (Fig. 31) se puede apreciar la clasificación de la pendiente de acuerdo a la erodabilidad que causa en el suelo, realizada a partir de

lo expuesto por RUGIERO (2006) en base a ARAYA – VERGARA & BORGEL (1972) y YOUNG (1972), quien clasifica el grado de erodabilidad de la pendiente en cuatro clases de acuerdo a valores mínimos y máximos de la variable medidos en grados determinando umbrales de erodabilidad que van desde la clase muy baja hasta la muy alta.

Figura 31: Erodabilidad según pendiente



Fuente: En base a ARAYA – VERGARA & BORGEL (1972) y YOUNG (1972) en Rugiero, (2006)

En la Tabla 33 se puede apreciar en la distribución de la erodabilidad relacionada a la pendiente. Podemos observar que la clase muy baja con una pendiente de

entre 0° y 2°, ocupa un 17% de la superficie comunal, mientras que la clase con una pendiente mayor a 20° se distribuye en el 32.69 % de la subcuenca de la comuna de Llay-Llay.

Tabla 33. Superficie en porcentaje de comuna de Llay-Llay, según grado de erosionabilidad causada por la pendiente del terreno

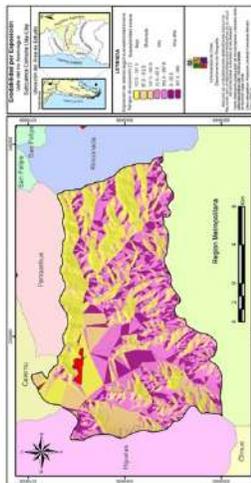
Comuna	Superficie %				
	Muy Bajo	Bajo	Moderado	Alto	Muy Alto
	0-2°	2-5°	5-10°	10-20°	>20°
Llay-Llay	17.02	6.74	15.45	28.10	32.69

Fuente: Elaboración propia partir de RUGIERO (2006)

### Exposición

La exposición se presenta de una manera muy variada en la comuna, como consecuencia de las fuertes pendientes existentes en la gran cantidad de cerros que circundan la cuenca. La clasificación de la exposición, de acuerdo a la erosionabilidad, según lo expuesto por el Servicio Agrícola y Ganadero (SAG) en el año 2005, se clasifica en cuatro clases de susceptibilidades erosivas de diferente intensidad que van desde la clase muy baja hasta la clase muy alta. Las clases de susceptibilidad erosiva por exposición de laderas están relacionadas al sentido de la exposición que se expresa en grados, (Fig. 32).

Figura 32: Erodabilidad según exposición de laderas



Fuente: Elaboración propia partir del SAG (2005)

La distribución de la erodabilidad por efecto de la exposición nos muestra que la clase muy alta se extiende por un 16.69 % de la superficie de la subcuenca de Llay-Llay, mientras que la clase de alta llega a distribuirse en un 30% de la superficie de la comuna (Tabla 34).

Tabla 34. Superficie en porcentaje de cada comuna, según grado de erosionabilidad causada por la exposición de la ladera

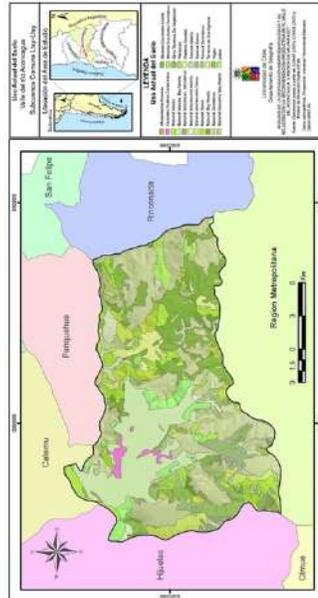
Comuna	Superficie %			
	Baja	Moderada	Alta	Muy alta
Llay-Llay	28.18	25.13	30.00	16.69

Fuente: Elaboración propia a partir del SAG (2005)

### **Erosionabilidad según Uso del Suelo**

Es un hecho real y comprobado que la clase de cobertura vegetal le otorga al suelo diferentes niveles de protección contra agentes erosivos como la precipitación. Para la determinación de la erodabilidad de acuerdo al uso del suelo en la comuna de Llay-Llay se empleó el estudio de Catastro de Bosque Nativo realizado por la CONAF-CONAMA en el año 2001. Cabe destacar que este Catastro se lo complementó con la superficie de cultivos de paltos existentes de acuerdo al estudio del CIREN (2007), (Fig. 33).

Figura 33: Cobertura Actual del Suelo



Fuente: Elaboración propia partir de CONAF-CONAMA (2001) y CIREN (2007)

La Tabla 35 permite observar la distribución porcentual de los diferentes usos del suelo al interior de la subcuenca de la comuna de Llay-Llay, producto de la combinación cartográfica digital de los estudios de Catastro de Bosque Nativo para la V Región, elaborado por la CONAF-CONAMA (2001) y del estudio de Determinación y Evaluación de la Fragilidad de Laderas en la Cuenca Hidrográfica del río Aconcagua, llevado a cabo por CIREN (2007).

Tabla 35: Distribución del Uso Actual del Suelo

Uso actual del suelo	Km <sup>2</sup>	%
Afloramientos Rocosos	0.9526	0.27
Ciudades-Pueblos-Zonas.Indus.	3.8119	1.09
Matorral Abierto	30.9298	8.85
Matorral Arbores. Muy Abierto	0.3277	0.09
Matorral Arborescen. Semidenso	8.8605	2.54
Matorral Arborescente Abierto	6.5811	1.88
Matorral Arborescente Denso	10.1478	2.90
Matorral Denso	13.0584	3.74
Matorral Muy Abierto	52.5684	15.05
Matorral Semidenso	113.6965	32.55
Matorral-Suculenta Muy Abierto	0.1495	0.04
Matorral-Suculentas Abierto	15.9267	4.56
Matorral-Suculentas Semidenso	12.0497	3.45
Otros Terrenos Sin Vegetación	0.1278	0.04
Plantación	0.3191	0.09
Praderas Anuales	8.9167	2.55
Renoval Abierto	2.6281	0.75
Renoval Denso	0.8787	0.25
Renoval Semidenso	1.2984	0.37
Terrenos de Uso Agrícola	53.5609	15.33
Vegas	0.2479	0.07
Paltos	12.5807	3.60
<b>Total</b>	349.34	100.00

Fuente: Elaboración propia partir de CONAF-CONAMA (2001) y CIREN (2007).

La determinación del grado de erodabilidad que presenta el suelo de la comuna de Llay-Llay, según el tipo de cobertura, se realizó considerando los criterios de ingenieros forestales y agrónomos pertenecientes a Instituciones chilenas como la Corporación Nacional Forestal (CONAF) y el Centro de Información de

Recursos Naturales (CIREN). De esta manera, se agrupó los diferentes tipos de cobertura del suelo en cuatro clases, enmarcadas desde un bajo efecto hasta la clase que presenta un efecto muy alto a la erodabilidad del suelo, en relación a su cobertura existente, (Tabla 36).

Tabla 36. Clasificación de Usos del Suelo en base a grado de erosionabilidad

<b>Uso Actual del Suelo</b>	<b>Grado de Erosionabilidad</b>
Matorral Arborescente Denso	Bajo
Renoval Denso	
Vegas	
Matorral Arborescen. Semidenso	Medio
Matorral Denso	
Matorral Semidenso	
Plantación	
Renoval Semidenso	Alto
Matorral Abierto	
Matorral Arbores. Muy Abierto	
Matorral Arborescente Abierto	
Matorral-Suculentas Abierto	
Matorral-Suculentas Semidenso	
Renoval Abierto	
Terrenos de Uso Agrícola	Muy alto
Matorral Muy Abierto	
Matorral-Suculenta Muy Abierto	
Praderas Anuales	
Otros Terrenos Sin Vegetación	
Paltos	

Fuente: Elaboración propia



comuna de Llay-Llay presenta un baja erodabilidad, mientras que las clases de erodabilidad media, alta y muy alta según este parámetro, se distribuyen en un 39%, 35% y 21% de la superficie comunal respectivamente, (Tabla 37).

Tabla 37. Superficie, según grado de erosionabilidad causada por el uso de suelo

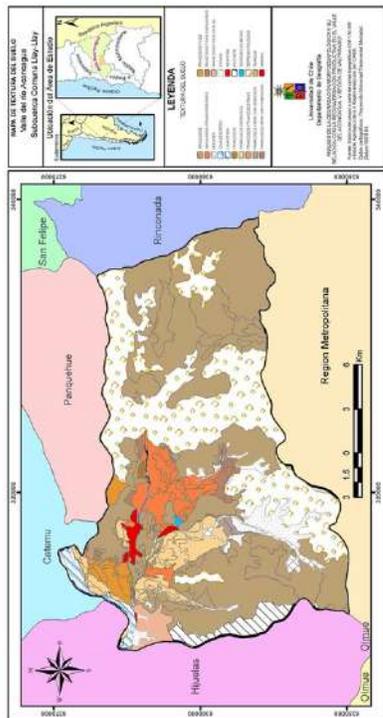
Subcuenca	Superficie %			
	Bajo	Medio	Alto	Muy alto
Llay-Llay	3.29	39.75	35.42	21.55

Fuente: Elaboración propia a partir de CONAF-CONAMA (2001) y CIREN (2007)

### **Erosionabilidad según Textura del Suelo**

El suelo en la comuna de Llay-Llay, de acuerdo al "Estudio Agrológico de la V Región" desarrollado por el CIREN-CORFO en el año 1997, en su gran mayoría es arcilloso ocupando un 46.40 % de la superficie total, seguidamente con un 28.32 % se aprecian las cubiertas rocosas, mientras que los suelos de textura arenosa cubren el 6% de la superficie total de la comuna (Fig. 35).

Figura 35: Textura del Suelo

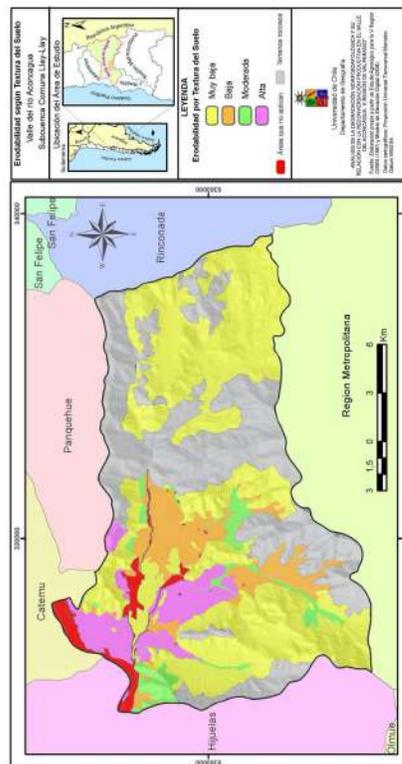


Fuente: CIREN (1997)

La determinación de la erodabilidad del suelo de la subcuenca de la comuna de Llay-Llay de acuerdo a su textura, se realizó en base a lo expuesto por Almorox (1994), Morgan (1997), IDEAM (2000), Ortiz (1984) en ALIAGA Y LEYTON (2007). De esta manera, se establecen cuatro clases de acuerdo al grado de erosionabilidad por textura, que parten de la clase muy baja correspondiente a los suelos arcillosos, arcillo limosos,

misceláneos coluviales hasta la clase con erodabilidad alta que incluye a los suelos areno francosos. Entre estos dos límites de muy baja y muy alta erodabilidad, se encuentran los suelos de textura franco limosa, francos y misceláneos quebrada, que se ubican en la clase moderada de erosionabilidad por textura. (Fig. 36).

Figura 36: Erodabilidad el suelo según Textura



Fuente: Elaboración propia a partir del CIREN (1997)

La distribución de la erodabilidad del suelo de acuerdo a la textura en la subcuenca de la comuna de Llay-Llay, muestra que un 47% de la superficie del área de estudio presenta clase muy baja, correspondiendo esta área a

suelos principalmente de textura arcillosa, los mismos que poseen una permeabilidad lenta y consistencia plástica, relacionados con los sectores preferentemente de uso forestal mientras que un 7% del área de estudio presenta una erodabilidad por textura alta. Cabe señalar que los suelos que se ubican en el fondo de valle se encuentran dominados por texturas francosas del tipo arcillosa y arenosa resultando con una de baja y alta erodabilidad por textura. Se debe destacar que la subcuenca de la comuna de Llay-Llay presenta un 31% de su superficie de terreno rocoso, esta área no fue considerada para efectos de la determinación de la erodabilidad por textura del suelo (Tabla 38).

Tabla 38. Superficie según grado de erodabilidad causada por la textura

Subcuenca	Superficie %				Terreno rocoso
	Muy baja	Baja	Moderada	Alta	
Llay-Llay	47,67	9,20	4,14	7,32	31,67

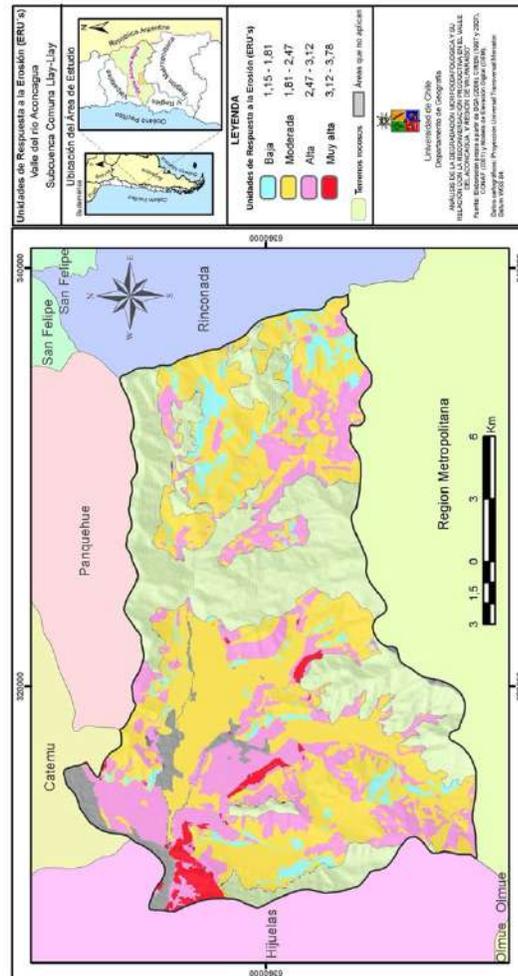
Fuente: Elaboración propia a partir del CIREN (1997)

### Definición de ERU's

La determinación de las Unidades de Respuesta de la Erosión implicó un proceso de sobreposición ponderada de las capas de información, generada de manera independiente, para de esta manera obtener producto

de las combinaciones unidades homogéneas de susceptibilidad a la erosión (Fig. 37).

Figura 37: Unidades de Respuesta a la Erosión (ERU's)



Fuente: Elaboración propia

Como resultado de la sobreposición y combinación de los factores físico-naturales ponderados con ayuda del software ArcGIS 9.2, se obtuvo 425 combinaciones, que tras someter a un proceso de reclasificación, permitió

discriminar en cuatro clases la susceptibilidad erosiva para la comuna de Llay-Llay (Tabla 39).

Tabla 39: Susceptibilidad erosiva para Comuna de Llay-Llay

<b>Susceptibilidad erosiva</b>	<b>Superficie (ha)</b>	<b>%</b>
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
<b>Total</b>	<b>22987,49</b>	<b>100,00</b>

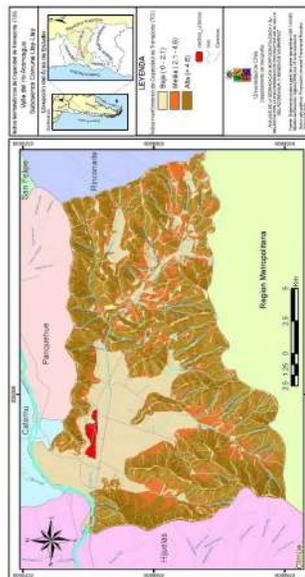
Fuente: Elaboración propia

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 presenta aumento principalmente de acuerdo a la elevación de la pendiente. De esta manera, se puede observar que para la clase de ERU's 1, que corresponde al nivel bajo de susceptibilidad erosiva, se encuentra distribuida en áreas con pendiente de hasta 20°, debido a la clasificación de la variable de uso del suelo en cuanto a su erodabilidad, así como por la importante ponderación que recibió esta variable físico-natural dentro del análisis jerárquico, en la determinación de las Unidades de Respuesta a la Erosión (ERU's). Por otra parte, las clases ERU's 3 y 4 tienden a concentrarse en mayor cantidad de superficie, en pendientes que van desde los 10° hacia arriba (Fig. 38).

## Determinación de Índices Morfométricos

El cálculo del Índice Morfométrico de Capacidad de Transporte (TCI) y de Estabilidad (SI) según lo expuesto en FERNÁNDEZ *et al.*,(2007) permite evaluar la dinámica topográfica de la subcuenca de la comuna de Llay-Llay. El Índice de Capacidad de Transporte determinó sectores con una baja capacidad en un 31% de la comuna y que se ubican en áreas ligeramente planas situadas en el fondo de valle principalmente, mientras que las zonas con una alta capacidad de transporte se encuentran situadas en su gran mayoría (54%) en las zonas de piedmonts, laderas y cerros (Fig. 40 y Tabla 40).

Figura 40: Índice de Capacidad de Transporte (TCI)



Fuente: Elaboración propia en base a (FERNÁNDEZ *et al.*, 2007)

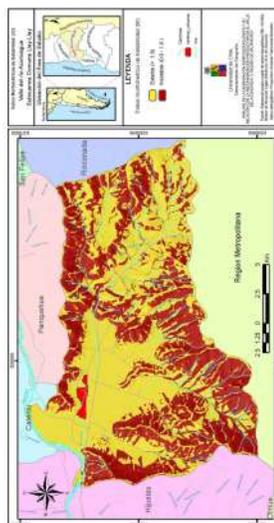
Tabla 40. Distribución del Índice de Capacidad de Transporte (TCI)

TCI	km <sup>2</sup>	%
Baja	110	31
Media	51	15
Alta	189	54
<b>Total</b>	<b>350</b>	<b>100</b>

Fuente: Elaboración propia a partir de (FERNÁNDEZ *et al.*, 2007)

El índice Morfométrico de Estabilidad de laderas (SI) determinó que en la comuna de Llay-Llay, las áreas estables se concentran en un 56 % en el fondo de valle, así como en áreas contiguas de ligera pendiente. El sector inestable, que comprende un 44% del área analizada, se circunscribe mayormente a las zonas escarpadas y de cerros, en donde se presentan fuertes pendientes (Fig.41 y Tabla 41).

Figura 41: Estabilidad de Laderas (SI)



Fuente: Elaboración propia en base a (FERNÁNDEZ *et al.*, 2007)

Tabla 41: Distribución del índice de Estabilidad de Laderas (SI)

<b>Estabilidad</b>	<b>km2</b>	<b>%</b>
Estable	194	56
Inestable	155	44
<b>Total</b>	<b>350</b>	<b>100</b>

Fuente: Elaboración propia partir de (FERNÁNDEZ *et al.*, 2007)

Las áreas inestables que presentan una inestabilidad alta dentro de la subcuenca de la comuna de Llay-Llay corresponden a los cordones de cerros el manzano, la bandera y aguas de la piedra así como a las lomas de las palomas, cerro las rocas por el sector nor-este. En cuanto al área sur-este el sector con alta inestabilidad resultante corresponde a la loma la enfriadera; mientras que el cordón el durazno, las lomas los burros, loma las tencas, loma de la media luna y loma las lagunillas se ubican como zonas de alta inestabilidad por el flanco sur-este. En el sector sur-oeste los elementos que presentan una inestabilidad alta pertenecen a los cordones de cerros el garfio, el maqui, las ventanas, corredores, blanco y colorado chico. Finalmente en el sector nor-este el sistema que resultó con una alta inestabilidad fue el cordón de cerros puntilla el dieciocho.

Para determinar la vulnerabilidad a la erosión de los suelos del valle del Aconcagua 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, para 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.

La evolución del valle del Aconcagua en relación a la reconversión productiva analizada a partir de la década de los años '70 a través de técnicas de teledetección por medio del Índice Normalizado de Diferencias Vegetales (NDVI) sobre imágenes Landsat ETM, y considerando también los estudios del Catastro de Bosque Nativo (CONAF, 1997) para el mismo sector, los censos agropecuarios (ODEPA, 1997 y 2007), así como el Catastro de Superficies de Frutales plantados por clase de pendiente en el valle (CIREN, 2007), ha permitido entender los cambios témporo-espaciales del valle del Aconcagua, en término del uso del suelo y la afectación que consecuentemente provoca a la

degradación morfoedafológica del sector, mediante el establecimiento de plantaciones de paltos sobre suelos frágiles con altas pendientes, ubicados sobre en las laderas de los cerros del valle.

El valle del río Aconcagua ha visto intensificado el uso de su suelo en los últimos años, mediante la utilización de las laderas de los cerros en donde antes existía vegetación nativa, caracterizada por formaciones esclerófilas y formaciones de arbustos y cactácea, las que predominan en laderas de exposición norte y áreas de mayor altitud.

Los arbustos en ambientes como el del valle del Aconcagua proporcionan estabilidad estructural a los ecosistemas, por lo cual su eliminación acelera de manera importante la erosión. La pérdida de suelo asociada a este cambio en el uso del suelo de laderas, consideradas como áreas frágiles, está básicamente ligada a la intervención antrópica en la dinámicas edáficas naturales del suelo, permitiendo de esta manera la ocurrencia del escurrimiento superficial y posterior depósito de sedimentos en los fondos de valles, provocando graves estragos en cultivos, obras civiles de regadío y cursos hídricos.

La erodabilidad de acuerdo al Uso del Suelo a partir del Catastro del Bosque Nativo para la V Región de

Valparaíso CONAF (2001), el Inventario de la Superficie Actual de Frutales en Ladera CIREN (2007), complementado con los criterios técnicos del autor de la presente investigación así como el de un importante grupo de profesionales forestales y agrónomos del CIREN y CONAF nos muestra que la subcuenca de la Comuna de Llay-Llay presentan apenas un 3% de su superficie con erodabilidad baja mientras que un 35% y 21% de la superficie de la subcuenca se corresponde con la clase de erodabilidad por Uso del Suelo alta y muy alta. Estas cifras nos indican que más del 50% de la superficie total de la comuna de Llay-Llay presenta altos índices de erodabilidad por Uso del Suelo como consecuencia de la presencia de varias clases de matorrales con diferentes densidades. Se debe destacar la presencia de algo más de 1000 ha cubiertas por plantaciones permanentes de paltos en las laderas de los cerros que rodean el fondo de valle de la subcuenca de estudio, y que por su fuerte impacto edafológico fueros clasificadas como de muy alta vulnerabilidad.

El determinar la vulnerabilidad a la erosión por efectos hídricos, obliga a considerar de manera integrada condiciones climatológicas, de relieve, cubierta vegetal y suelo. La estimación de la erosión requiere el desarrollo de un procedimiento basado en el

estudio individual de cada factor involucrado, para acto seguido realizar la evaluación de las consecuencias generadas en torno a la erosión dentro de las diversas combinaciones resultantes (CIREN, 2009). Las Unidades de Respuesta a la Erosión (ERU's), definidas metodológicamente por una superposición y combinación geoespacial de variables ponderadas, muestran en el área testigo de estudio (subcuenca de la comuna de Llay-Llay), áreas homogéneas de susceptibilidad a la erosión clasificadas por rangos de importancia y que se corresponden significativamente con el estudio realizado para la misma zona por el Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN, 2009) con la aplicación de una metodología distinta.

El riesgo de erosión potencial, es interpretado como la dimensión de máxima pérdida de suelos posible ante la carencia de una cobertura vegetal y de prácticas de conservación (LAGOS, 2005). Dentro de los planes de conservación en tierras inclinadas es fundamental evaluar el riesgo de erosión (LAGOS, 2005).

El Índice Modificado de Fournier (IMF), Arnoldus (1978) como indicador de la erosividad a diferencia del Índice de Fournier, (Fournier 1960) considera que existen zonas cuyo régimen pluvial presenta más de un pick mensual de precipitación, siendo este el caso del valle del

Aconcagua. De esta manera los valores de erosividad obtenidos para la comuna de Llay-Llay en base al cálculo de las series de datos con 35 años de precipitación mensual en catorce estaciones presentes en el valle del Aconcagua muestra en un 51% de la superficie de la comuna la presencia de una zona con moderada erosividad que se concentra en la parte central y poniente coincidiendo con cotas altitudinales de entre 500 msnm y 2000 msnm y con pendientes mayores a 20° mientras que la erosividad pluvial de la clase alta se distribuye en un 47% del sector central y oriente de la comuna cotas de altitud que llegan mayormente hasta los 1500 msnm y con pendientes que alcanzan valores superiores a los 20°, aunque en menor cantidad de superficie.

Determinado el riesgo de erosión en el área de estudio de acuerdo a una escala de afectaciones, es evidentemente necesario proporcionar a las áreas prioritarias de una cobertura vegetal más densa que actúe como una estructura natural para el control del escurrimiento en pendiente y seguidamente atender a aquellas áreas con menor riesgo de 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 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.

Los índices Morfométricos de tipo sintético como el índice de Estabilidad (*Stability Index, SI*) y el Índice de Capacidad de Transporte (*Transport Capacity Index, TCI*), se constituyen en un importante indicador de la dinámica de las características topográficas existentes en la subcuenca testigo de la comuna de Llay-Llay, lo cual queda evidenciado en el primer caso, mediante la delimitación de áreas de suelo con determinada propiedad de estabilidad ante la ocurrencia de un evento de desprendimiento y remoción de detritos, mientras que en el segundo caso, a través de la identificación de áreas con distintas capacidades de acarreamiento de material desprendido por la acción de la lluvia principalmente.

La principal causa para la degradación del suelo en ambientes del tipo mediterráneo como en el que se desarrolla el valle del Aconcagua se debe a la

eliminación de la vegetación del bosque nativo y matorrales, (GARCÍA, 2004), lo cual se refleja en áreas donde se ha realizado la reconversión productiva eliminando la vegetación nativa de la zona, y que dentro de nuestra investigación presentan una susceptibilidad alta a la erosión.

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.

El uso histórico del suelo de la subcuenca de la comuna de Llay-Llay a partir de la década de los ´70 mediante la aplicación del (NDVI) determinó para el área de

estudio importantes niveles de densidad vegetal que se ubicaron en los rangos moderadamente bajo y bajo, MÄRKER *et al.*, (2001), mientras que para el año 2007, se observa un importante cambio en relación a la cobertura del suelo que se expresa con densidades vegetacionales concentradas equitativamente en las clases moderadamente baja y moderadamente alta. Dentro del mismo uso histórico del suelo en la comuna de Llay-Llay los estudios de la ODEPA (1997 y 2007), CONAF (2001) y CIREN (2007) permiten observar cambios en el uso del suelo en estos últimos trece años, destacando las áreas establecidas con plantaciones de paltos mientras que el resto de los usos del suelo no presentan mayores cambios, manteniéndose las praderas, matorrales, suelos de usos agrícolas y las escasas plantaciones forestales.

La hipótesis que sustenta esta investigación, relacionada con la reconversión productiva y el incremento de la vulnerabilidad a la erosión en el valle del río Aconcagua, queda validada al comprobar los cambios acaecidos en el tiempo en la superficie del área de estudio, referidas a la densidad vegetal y al manejo del suelo.

Se observó importantes diferencias en la cobertura vegetal en el área de estudio, ocurridas entre las décadas de los '70 y los '80. Para las dos siguientes

décadas, esto es hasta el año 2007, la densidad vegetal no presenta mayor variabilidad, lo cual queda validado al contrastar con los datos estadísticos recogidos en los Censos Agropecuarios para la misma época.

El tipo de cobertura vegetal dentro de la determinación de la vulnerabilidad a la erosión para la comuna de Llay-Llay ejerce un efecto importante de acuerdo a su densidad y ciclo de vida. De esta manera, en la subcuenca de estudio, se puede apreciar sectores de baja y moderada susceptibilidad a la erosión que presentan una cobertura del suelo de baja erodabilidad, a pesar de presentar pendientes muy importantes, por lo que la importancia del tipo de cobertura en la atenuación de los efectos de la erosión hídrica, es significativa.

La distribución de las Unidades de Respuesta a la Erosión (ERU's) está fuertemente influenciada por la cobertura del suelo, el manejo agrícola y la textura del suelo. Como consecuencia de esto, los suelos cubiertos por renovales y matorrales arborescentes densos, que no presentan intervenciones poco sustentables y que poseen suelos con texturas arcillosas, en combinación con el contenido de materia orgánica permiten mayor estabilidad y se presentan con una baja vulnerabilidad

a la erosión, ubicándose en los sectores concentrados al este y oeste de la comuna.

De manera opuesta, los suelos cubiertos por matorrales arborescentes muy abiertos y por plantaciones de paltos, con texturas más arenosas, acompañadas de plantaciones de paltos en camellones a favor de la pendiente, presentan una muy alta vulnerabilidad a la erosión, ubicándose estas áreas en los sectores central y nor-oeste de la subcuenca de la comuna de Llay-Llay.

La subcuenca de Llay-Llay presenta niveles de erosividad moderado y alto que para el caso del nivel alto, afecta el sector oeste de la subcuenca de estudio, precisamente donde se distribuyen las mayores cotas altitudinales, siendo áreas cubiertas por diversas clases de matorrales y cultivos agrícolas.

El efecto que la erosividad de la precipitación ejerce, al igual que el elevado nivel altitudinal, quedan atenuados frente al tipo y densidad de la cobertura vegetal del suelo, como se puede apreciar en la distribución de las ERU's de muy baja vulnerabilidad en la subcuenca de estudio.

Las exposiciones N, NE y NO, tienen la mejor aptitud para el establecimiento de paltos en laderas de cerros. Sin embargo, estas exposiciones de solana en la

subcuenca de la comuna de Llay-Llay presentan una alta y muy alta erodabilidad respectivamente, producto de la exposición a la mayor influencia a la insolación y a las lluvias.

El análisis de la dinámica topográfica de la subcuenca de Llay-Llay establece la presencia de importantes sectores inestables como los constituidos por los cordones de cerros El Manzano, La Bandera y Aguas de la Piedra, por el sector nor-este y los cordones de cerros El Garfio, El Maqui y Las Ventanas, por el flanco sur-oeste.

El establecimiento de la erosión potencial para la subcuenca de la comuna de Llay-Llay, de acuerdo a la escala de prioridades definidas mediante las ERU's permite recomendar que se considere necesario la atención de las áreas con mayor afectación, aplicando programas de forestación y reforestación para atenuar el efecto del escurrimiento superficial en áreas de importantes pendientes como las existentes en zona de estudio, dado que, el establecimiento de la cobertura vegetal, se constituye en la medida de manejo más económica y eficiente para la conservación de suelos inclinados.

## **BIBLIOGRAFÍA**

ACUÑA A., Aguilera R., Aguayo M., Azócar G., Barra R., Fuentes D., González P., Mendoza R., Paredes K., Parra O., Priego C., Rojas J., Romero H., Sobarzo M., Valdovinos C., Valenzuela M., Villalobos A., Zaror C., Urrutia R. Conceptos básicos sobre medio ambiente y desarrollo sustentable. Agencia de Cooperación Alemana (GTZ). Buenos Aires, 2007. 187p.

ALIAGA S. C., Leyton H. N. 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 para optar al título de (Ingeniero Civil en Geografía). Santiago, Chile. Universidad de Santiago de Chile, Facultad de Ingeniería, 2007. 130 h.

ALONSO C., Moreno V. 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, 1996.12 p.

ARAYA-VERGARA. Apuntes Cátedra de Geomorfología. Escuela de Geografía. Universidad de Chile. Santiago, Chile. 2002.

AVALOS, V. Validación de un protocolo de campo para la elaboración de indicadores biofísicos de la desertificación. Tesis para optar al título de (Ingeniero

Agrónomo). Santiago, Chile. Universidad de Chile, 2004. 68 p.

BÖRGEL, R. La estructura del relieve como patrón principal de los estudios de impacto ambiental. *Revista de Geografía Norte Grande*, 31: 115-122. 2004

BUTTERWORTH R., Cunningham r. B., Greene R. S. B., Herron N. F. & Wilson C. J.. "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, 2000. pp. 1161 – 1179.

CADE IDEPE. 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, 2004. 160p.

CARRASCO, J. y Riquelme, J. Métodos y prácticas de conservación de suelos y aguas. Instituto de investigaciones agropecuarias, INIA. Boletín N° 103. Rancagua, Chile, 2003. 132p.

CARRASCO J., Squella F., Vergara J. Técnicas de conservación y recuperación de suelos y aguas. En su: *Métodos y Prácticas de Conservación de Suelos y Aguas.* Boletín Instituto de Investigaciones Agropecuarias, INIA. Boletín N° 103. Rancagua, Chile, 2003. pp. 45-89.

CASANOVA, M. y Urra, M. Fundamentos de topografía aplicada a la agricultura. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agronómicas, Depto. Ingeniería y Suelos. Santiago, Chile, 2000. 109p.

CASANOVA M., Vera W., Luzio W., Salazar O. Guía de Clases Prácticas de Edafología. Facultad de Ciencias Agronómicas, Departamento de Ingeniería y Suelos, Universidad de Chile, 2004. 75p.

CASAS, R. Sustentabilidad de la agricultura en la región pampeana. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, INTA-Castelar. 2003.

CASTRO, C. Vulnerabilidad y Niveles de Degradación del Sistema Morfoedafológico a las Transformaciones Productivas y Expansión Urbana. Proyecto de Concurso Regular (CONICYT), 2007.

CASTRO, E y ESPINOSA M. Evaluación Ambiental de plantaciones de paltos en laderas. Cuenca del río Petorca. Región de Valparaíso. Tesis para optar al título de (Magíster en Ingeniería y Gestión Ambiental, mención Auditoría ISO 14001). Santiago, Chile. Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN), 2008. 170 p.

CENTRO DE INFORMACIÓN DE RECURSOS NATURALES (CIREN). Determinación de Erosión actual y fragilidad de

suelos en la V Región utilizando datos satelitales y SIG. Santiago, Chile, 2009. 82 p.

CENTRO DE INFORMACIÓN DE RECURSOS NATURALES (CIREN). Determinación y evaluación de la fragilidad de laderas en la cuenca de Casablanca y en las cuencas hidrográficas de los ríos Petorca, La Ligua y Aconcagua V Región. Santiago, Chile, 2007. 73 p.

CERDÁ A. La erosión del suelo y sus tasas en España. Ecosistemas. 3(16):, 2001.

COMISIÓN ECONÓMICA PARA AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE (CEPAL). 2002. Globalización y Desarrollo. Vigésimo noveno período de sesiones, Brasilia, (Documento disponible en <http://www.cepal.org>).

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

CHUVIECO, E. Teledetección Ambiental. La Observación de la Tierra desde el Espacio. Tercera edición. Ediciones Ariel. Barcelona, España. 2008. 587p.

COMISIÓN NACIONAL DEL MEDIO AMBIENTE (CONAMA). Manual de Evaluación de Impacto Ambiental: Conceptos y Antecedentes Básicos. Alfabetá Impresores. Santiago, Chile, 1994. 150 p.

CORPORACIÓN CHILENA DE LA MADERA (CORMA). Para contrarrestar la peor calamidad ambiental de Chile, la erosión de suelo. Concepción, 2005.

CORPORACIÓN CIEM ACONCAGUA. Patrimonio natural de Aconcagua. San Felipe, Chile, 2001. 100 p.

CUEVAS, J., DÖRNER, J. y ELLIES, A. Elementos de física y mecánica para evaluar la sustentabilidad de suelos agrícolas. Revista de la Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal, 4 (2): 1-13. 2004

DAHER, A. Competencia: Regiones ganadoras y perdedoras en Chile. En: Instituto de Estudios Urbanos Universidad Católica de Chile., Revista EURE. 27 (60): 63 - 84. 1994.

DONOSO, C. Ecología Forestal. El bosque y su medio. Editorial Universitaria, Santiago, 1992. 369 p.

ELLIES S, A. Soil erosion and its control in Chile – An overview. Acta Geológica Hispánica, 35: 279-284, 2000.

EUGENIN AGUILAR, J. Propuesta de ordenación para la subcuenca del estero Llancahue, comuna de valdivia, X región de los lagos. Tesis para optar por el título de (Ingeniero Forestal). Temuco, Chile. Universidad de Temuco, Facultad de Ciencias Agropecuarias y Forestales, 2004. 194 p.

ESPINOZA, J. LAGOS, M. ORTIZ, A. 1994. Erosión de los Suelos de Chile. Organización de las Naciones Unidas para la agricultura y la alimentación (FAO), (Documento disponible en <http://www.fao.org>).

FAVIS-MORTLOCK, D.T., GUERRA, A.J.T. The implications of general circulation model estimates of rainfall for future erosion: a case study from Brazil. *Catena* (37): 329–354, 1999.

FERNÁNDEZ, R. Evaluación Espacial de Procesos Erosivos y su Influencia sobre el Corredor de Comercio Las Leñas, VI Región del Libertador Gral. Bernardo O’Higgins. Tesis para optar al título de (Geógrafo). Santiago, Chile. Universidad de Chile, Facultad de Arquitectura y Urbanismo, 2006. 91 p.

FERNÁNDEZ R., PAZ C., RUGIERO V. 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. 2007.

FERNÁNDEZ R., PAZ C., RUGIERO V. Aplicación de índices morfométricos en la evaluación de los procesos geodinámicas presentes en la Región Metropolitana de Santiago. Resúmenes de ponencia Congreso de Geografía 2007 [en línea] <<http://www.sociedadchilenadecienciasgeog>

raficas.cl/sccg/Ponencias\_2007/Resumenes%20de%20ponencia.pdf> [consulta: 28 octubre 2009].

FERRANDO, F. Bases para la Confección de Cartas de Erodabilidad. Anales de la Sociedad Chilena de Ciencias Geográficas, XIV Congreso de Geografía y V Jornada de Cartografía Temática. Universidad de Talca. pp. 1-8 1992.

FRANCKE, S. Control de erosión en terrenos degradados vía DL. 701 de Fomento Forestal. En: PEREZ, C. Manejo de Microcuencas y Prácticas Conservacionistas de Suelo y Agua. Serie de Actas N°22. Chillán. Chile. pp. 55-82. 2002.

GARCÍA P. Ecología del bosque mediterráneo en un mundo cambiante En: Valladares, F. Interacciones entre la vegetación y la erosión hídrica. Madrid, Ministerio de Medio Ambiente, 2004. pp. 309-334.

GAREN, D. A user agency's view of hydrologic, soil erosion and water quality modelling. Catena. (37): 277-289, 1999.

GONZÁLEZ M., MALDONADO F., OJEDA S. Diagnóstico participativo del valle de Aconcagua. Una visión desde el enfoque territorial. Fundación para la superación de la pobreza. Valparaíso, Chile. 2006.

GOUDIE A. The Nature of the Environment. Second Edition. Basil Blackwell. Great Britain. 388: 1989.

HENRIQUEZ, C. Modelación, impacto ambiental y sustentabilidad del crecimiento urbano en las ciudades intermedias de Chillán y los Ángeles. Tesis para optar al título de (Doctor en Ciencias Ambientales). Concepción, Chile. Universidad de Concepción, 2005. 310 p.

HERBERT L. Contribución al estudio y manejo de la cuenca alta del río Turrialba, costa rica. Tesis para optar por el título de (Magister en Ciencias), Turrialba, Costa Rica. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), 2003. 136 h.

HONORATO, R. Manual de Edafología. Ediciones Universidad Católica de Chile. Santiago, 1993. 195 p.

HOFIERKA, J. Modelling spatial and temporal changes of soil water erosion. Soil Water Erosion Modelling Conference, 1996.

JAQUE, E. Los Factores Geográficos en los Procesos de Derrumbe y Deslizamiento. Discusión Bibliográfica. Revista Geográfica de Chile Terra Australis 40. Santiago, Chile: 31 - 42., 1995.

JORDÁN A., BELLINFANTE N. Cartografía de la erosividad de la lluvia estimada a partir de datos pluviométricos

mensuales en el campo de Gibraltar (Cádiz). Revista Edafología. 7: 83- 92, 2000.

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

LAL, R. Erodibility and erosivity. pp: 141-160. In: Lal, R. (Ed.) Soil erosion research methods. CRC Press. New York, EEUU, 1988. 244 p.

LANE, L. et al . Modelling erosion on hillslopes: concepts, theory and data. USDA-ARS, Southwest Watershed Research Center, Tucson, AZ, USA, 1997.

LIENLAF, M. Caracterización de Procesos Erosivos en Microcuencas de la Comuna de San Pedro, Provincia de Melipilla. Tesis para optar al título de (Geógrafo). Santiago, Chile. Universidad de Chile. Facultad de Arquitectura y Urbanismo, 2003.

LÓPEZ, F. Restauración Hidrológico Forestal de Cuencas y Control de Erosión. Tragsa-Tragsatec. Madrid, 1994. 902 p.

MÄRKER, M., S. MORETTI & G. RODOLFI. Assesment 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). Geografía Física e Dinámica Cuaternaria, 24: 71-83. 2001

MEYER, L.D. Soil erosion concepts and misconceptions. In: Third Federal Inter-Agency Sedimentation Conference. Denver, Colorado, 1976. Proceedings. Sedimentation Committee Water Resources Council, Denver, 1976. 12 p.

MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS Y TRANSPORTES (MOPT). Guía para la elaboración de estudios del medio físico, contenido y metodología. Santiago, 809 p. 1992.

MITASOVA, H. GIS tools for erosion/deposition modelling and multidimensional visualization. Part III: Process based erosion simulation. Geographic Modelling and Systems Laboratory, University of Illinois, 1996. 20 p.

MORGAN R.P.C. Erosión y conservación del suelo. Ediciones Mundi Prensa, España, 1997.

OLIVER, J. Monthly Precipitation Distribution: a comparative index. Professional Geographer. 32( 3): 300 – 309. 1980.

OLIVER, M.A. y Webster, R. Kriging: a method of interpolation for geographical Information Systems. Int. J. Geographical Information Systems, 4(3): 313-332. 1990.

ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA AGRICULTURA Y LA ALIMENTACIÓN (FAO). Necesidades

y recursos. Geografía de la agricultura y la alimentación. 1995.

PERALTA, J.M. Agentes erosivos y tipos de erosión. Tecnologías de Conservación de suelos y agua. Programa de capacitación a agentes de extensión. INIA – Serie Platina N° 46. Santiago. Chile: 14 – 81. 1993.

PIKE, R. J., A bibliography of geomorphometry. United State Geological Survey Open-File Report, 132: 93-262. 1993.

PRADO, W; DA VEIRA, M. Erosión y pérdida de fertilidad del suelo. Tema 2. En: Erosión de Suelos en América Latina. Proyecto GCP/RLA/107/JPN, FAO. 1994.

PROGRAMA DE LAS NACIONES UNIDAS PARA EL DESARROLLO (PNUD). Desarrollo humano en Chile rural 2008. Santiago de Chile, 252 pp. 2008.

RAYMOND, D., Hammer, R. Soil Geomorphology, Jhon Wiley & Sons, New York. 236 p. 1992.

RENARD, K.G., Foster, G.R., Weesies, G.A., McCool, D.K. and Yoser, D.C. Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). Agricultural Research Service, Agricultural Handbook Number 703. USDA. EEUU. 335 p. 1997.

RIFFO, M. Globalización de la Economía e impacto espacial en las áreas rurales de la zona central de Chile. Revista de Historia y Geografía., N° 164, 1998.

RODRÍGUEZ, P. 1993. Proposición de una definición profunda de SIG, en Actas del 2° Congreso de la Asociación Española de Sistemas de Información Geográfica (AESIG). Madrid: 127-142. 1993.

RUGIERO DE SOUZA, Vanessa. 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 para optar al título de (Geógrafa) Santiago, Chile. Universidad de Chile. Facultad de Arquitectura y Urbanismo, 2006. 215 h.

RUIZ, G. Manual de especificaciones técnicas de buenas prácticas de manejo de suelos en laderas. Serie técnica N° 20. Servicio Agrícola y Ganadero, SAG. Santiago, Chile, 2005. 56 p.

SAATY, T. L. & KEARNS, K. Analytical Planning. The Organization of Systems. The Analytic Hierarchy Process Series Vol. IV. RWS Publications. Pittsburgh, PA, EE.UU, 1991. 208p.

SAAVEDRA C., P., MANNAERTS C. Evaluación y monitoreo de modelos de erosión y sedimentación a

escala regional usando sensores remotos y SIG. Caso de estudio en la región Andina, Cochabamba, Bolivia. En: CONFERENCIA LATINOAMERICANA sobre Manejo de cuencas: "Desarrollo Sostenible en Cuencas", 15 p. 2003.

SANJAY, K. J; Pratap, S. Assessment of sedimentation in Bhakra reservoir in the western Himalayan region using remotely sensed data. Hydrological Sciences Journal. 47: 203-211, 2002.

SERVICIO AGRÍCOLA Y GANADERO (SAG). Desarrollo de una metodología para la evaluación y mitigación de la contaminación de aguas y suelo: Aplicación a la cuenca del río Aconcagua. Santiago, 2005. 242p.

SCHUMM, S A. The Fluvial System. New York, Wiley & Sons, 1977. 338 p.

SOIL SURVEY STAFF. Soil survey manual. Soil Conservation Service. U.S. Department of Agriculture. Handbook 18. U.S. Gov. Print. Office, Washington, DC, EEUU, 1993. 437p.

TRICART, J. & Kilian, J. La Eco-Geografía y La Ordenación del Medio Natural. Editorial Anagrama. Barcelona, España, 1982. 288p.

VAN ZUIDAM, R.A. Terrain analysis and classification using aerial photographs. International institute for aerial

survey and earth sciences, ITC-TextbookVII-6, 2. Ed., Enschede. 1985.

VERDUGA, J. Desarrollo de una metodología para evaluar la susceptibilidad de los taludes de suelo al efecto de la erosión por flujo superficial. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile. Santiago. 2007.

ZHANG, X. Scaling land surface parameters for global scale soil erosion estimation, 2001.

ZHANG, X. Scaling issues in environmental modelling. In Environmental Modelling: Finding simplicity in complexity. John Wiley & Sons Ltd., 2002.

ZHANG, X. Comparison of slope estimates from low resolutions DEM's: Scaling issues and a fractal method for their solution. Earth Surface Processes and Landforms, 24: 763-779. 1999.

## ***Descubre tu próxima lectura***

Si quieres formar parte de nuestra comunidad, regístrate en <https://www.grupocompas.org/suscribirse> y recibirás recomendaciones y capacitación



   @grupocompas.ec  
compasacademico@icloud.com

compAs  
Grupo de capacitación e investigación pedagógica



@grupocompas.ec  
compasacademico@icloud.com



ISBN: 978-9942-33-173-1



9 789942 331731



@grupocompas.ec  
compasacademico@icloud.com

**compas**  
Grupo de capacitación e investigación pedagógica